

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Eng.

PAR
BONZIL NOËL

ÉVALUATION DES COÛTS AUX USAGERS DE LA ROUTE DANS UN
CONTEXTE NORDIQUE

MONTREAL, LE 12 SEPTEMBRE 2005

© droits réservés de Bonzil Noël

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Gabriel J. Assaf, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Saad Bennis, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Joseph Jovenel Henry, membre du jury
C.E.R.I.U., directeur technique- réseaux techniques urbains

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 4 AOÛT 2005

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

ÉVALUATION DES COÛTS AUX USAGERS DE LA ROUTE DANS UN CONTEXTE NORDIQUE

Bonzil Noël

SOMMAIRE

Ce mémoire de recherche est la continuité des efforts menés à l'ÉTS en vue d'élaborer des modèles de comportement des chaussées souples et le calibrage des modèles de performance des chaussées rigides avec HDM-4 pour le MTQ en incluant: 1) une argumentation avec la nécessité d'introduire les coûts aux usagers de la route comme une priorité dans les pratiques d'entretien et de réhabilitation; 2) une série de simulations afin d'évaluer les coûts aux usagers à l'aide du logiciel HDM-4 compatible à tous les climats; 3) ces simulations permettant aussi de faire une estimation des coûts d'exploitation des véhicules (CEV) selon l'état de la chaussée pour, au moins, les vingt (20) prochaines années avec des réductions de CEV selon les différents budgets alloués à la réhabilitation et la reconstruction des chaussées; 4) certaines recommandations sont faites aux administrations routières en vue d'intégrer les coûts aux usagers routiers dans le système de gestion de la route.

ÉVALUATION DES COÛTS AUX USAGERS DE LA ROUTE DANS UN CONTEXTE NORDIQUE

Bonzil Noël

SOMMAIRE

Les campagnes de réhabilitation et d'entretien des chaussées souples deviennent de plus en plus importantes au point de vue socio-économique. Les modèles de comportement des chaussées utilisés dans HDM-4 ont permis de comprendre l'importance de l'évolution de l'état des structures des chaussées ainsi que la réalité de la gestion de leur entretien et leur réhabilitation.

Beaucoup d'efforts sont menés à l'École de technologie supérieure (ÉTS) en vue d'élaborer des modèles de comportement des chaussées souples et le calibrage des modèles de performance des chaussées rigides avec HDM-4 pour le Ministère des Transports du Québec. Ce projet de recherche est la continuité de ces efforts en incluant: 1) une argumentation avec la nécessité d'introduire les coûts aux usagers de la route comme une priorité dans les pratiques d'entretien et de réhabilitation; 2) une série de simulations afin d'évaluer les coûts aux usagers sur la rue Notre-Dame à l'aide du logiciel HDM-4 dont certains de ces modèles peuvent répondre aux conditions climatiques québécoises; 3) ces simulations permettant aussi de faire une évaluation et une estimation des coûts d'exploitation des véhicules (CEV) selon l'état de la chaussée sur la rue Notre-Dame pour, au moins, les vingt (20) prochaines années avec des réductions de CEV conséquent à divers niveaux d'augmentation des budgets alloués à la réhabilitation et la reconstruction des chaussées; 4) un ensemble de recommandations faites aux administrations provinciales et municipales en vue d'intégrer les coûts aux usagers routiers dans le système de gestion de la route.

La méthodologie de l'évaluation des coûts aux usagers est établie selon les différentes étapes de détériorations retenues du logiciel HDM-4. Les résultats retenus sont ceux qui paraissent les plus avantageux aux points de vue technique et économique suivant tous les modèles de détérioration de HDM-4. Il est donc important de recommander à tous les utilisateurs de HDM-4 de savoir que le logiciel HDM-4 requiert une base de données assez exhaustives pour procéder à l'évaluation des coûts aux usagers qui sont de plus en plus sérieux pour la société québécoise. Cette étude vise à aider les administrateurs de la route à bien justifier les budgets accrus pour la réhabilitation des routes.

THE ROAD USER COSTS EVALUATION IN THE NORTHERN CONTEXT

Bonzil Noël

ABSTRACT

The maintenance and rehabilitation of flexible pavements are becoming increasingly important from the socio-economic point of view. The use of the management system by the road agencies does not always include all the aspects of the road user costs after having exploited all the pavement deterioration models. The pavement performance models used in HDM-4 allowed recognising the importance of the evolution road's state as well as the reality of roadway maintenance and rehabilitation management system according to their structural characteristics and their operating conditions.

Many efforts have been carried out to the École de technologie supérieure (ÉTS) for elaborating performance pavement models of the Quebecois road network. This project is concentrating on the user costs evaluation on the Notre-Dame street using software HDM-4 by treating the flexible pavement performance models and their characteristics. The bituminous pavement types include asphalt mix or surface treatment, surface layers over asphalt, stabilised or granular bases. The models of deterioration of the flexible pavements of HDM-4 of the World Bank are the results of several associations, organizations and administrations. Some of these models are able to answer the Quebec climatic conditions and allow us to simulate several options of pavement rehabilitation within the framework of the costing to the road users.

The report is carried out in several stages which consist in presenting 1) the portrait of the state of the Notre-Dame street; 2) the evaluation and the estimation of vehicle operating costs (CEV) depending of the pavement state; 3) some simulations and reductions of CEV at several levels of increasing in the budgets allocated for the rehabilitation and the rebuilding of the pavement. Some models presented in HDM-4 can detect the different defects of surface and their characteristics. The evaluation methodology of the user costs is established by different stages of deteriorations retained of software HDM-4. The data are provided either by the town of Montreal or by the Ministry of Transport of Quebec (MTQ) or in the studies already carried out at ÉTS. The results selected are those which appear most technical and economic advantageous. So, it is important to recommend to all the users of HDM-4 of knowing that the software HDM-4 requires an exhaustive data base to carry out the costing evaluation to the users.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Dieu au nom du Sauveur et Seigneur Jésus-Christ qui, dans son amour infini et sa grâce parfaite, m'a donné de la force nécessaire pour que je puisse réaliser ce projet d'une part, et d'autre part mon directeur de recherche, M. le professeur Gabriel J. Assaf, ing., Ph.D., qui, par ses conseils et ses précieuses interventions, m'a orienté tout le long de cette recherche, et qui a toujours manifesté de grands intérêts pour ce projet. Et j'en suis infiniment reconnaissant.

Mes remerciements vont également à tous les professeurs de l'ÉTS qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont inculqué des notions nécessaires durant mon passage dans cet établissement. Je voudrais aussi présenter ma profonde gratitude à toute l'équipe de l'ÉTS qui est si dynamique, organisée et efficace.

Finalement, je ne pourrais pas terminer sans présenter mes remerciements à toute ma famille, mes parents, amis et collègues de travail pour leur soutien sans nombre tout le long de mes études.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE.....	i
ABSTRACT.....	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES.....	xi
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 DESCRIPTION DE CE MÉMOIRE DE RECHERCHE.....	4
1.1 Objectifs du mémoire.....	4
1.2 Présentation du mémoire.....	6
1.3 Méthodologie de ce mémoire.....	7
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE ET DÉVELOPPEMENT DE HDM-4.....	8
2.1 Historique de HDM-4.....	8
2.1.1 Objectifs de développement de HDM-4.....	9
2.2 Structure de HDM-4.....	10
2.2.1 Analyse de la planification stratégique.....	10
2.2.2 Analyse de la programmation des travaux routiers.....	11
2.2.3 Analyse des projets routiers.....	11
2.2.4 Études de recherche et de la politique.....	12
2.3 Gestion des données.....	12
2.3.1 Rôle de HDM-4 dans la gestion de route.....	13
2.3.2 Modèles utilisés en HDM-4.....	15
2.3.3 Coûts aux usagers de la route.....	16
2.3.3.1 Coûts d'exploitation et les vitesses des véhicules.....	16
2.3.3.2 Concepts de modélisations.....	17
2.3.3.3 Paramètres de la modélisation primaire.....	17
2.3.3.4 Procédure informatisée.....	18
2.4 Modèle de congestion débit-vitesse.....	19
2.4.1 Effets d'accélération et décélération.....	22
2.4.2 Concepts de modélisation du transport non motorisé.....	26

2.5	Sécurité routière.....	28
2.6	Évaluation économique des projets routiers.....	30
2.6.1	Analyse de la période budgétaire.....	33
2.6.2	Analyse de la rentabilité de projets.....	34
2.6.3	Coûts économiques et financiers.....	35
2.6.4	Possibilités de risque.....	35
2.6.5	Priorité dans la sélection des projets.....	36
2.7	Coûts à l'administration	37
CHAPITRE 3	CARACTÉRISTIQUES DES CHAUSSEES SOUPLES.....	39
3.1	Structure des chaussées souples.....	39
3.2	Nombre structural.....	39
3.3	Types de matériaux de surface et de fondation	42
3.4	Paramètres d'utilisation de base.....	45
3.4.1	Qualité de construction des chaussées souples.....	46
3.4.2	Modèles de fissures.....	48
3.4.3	Modèles de nids de poule.....	49
3.4.4	Fissures en rive selon HDM-4.....	49
CHAPITRE 4	SAISIE DES DONNÉES ET ANALYSE DES RÉSULTATS.....	51
4.1	Réseau routier du Québec.....	51
4.2	Ajustement des facteurs de calibration de l'uni.....	53
4.3	Conditions climatiques.....	55
4.4	Processus d'analyse dans le cas de cette étude.....	55
4.5	Données de section.....	57
4.6	Classification des travaux routiers.....	58
4.7	Types de travaux.....	58
4.7.1	Entretien courant ou de routine.....	59
4.7.2	Réhabilitation des chaussées.....	59
4.7.3	Coûts unitaires des travaux routiers.....	60
4.8	Données retenues du modèle RUE pour calculer le CEV.....	60
4.8.1	Coûts des véhicules neufs.....	60
4.8.2	Coûts de carburant et d'huile.....	62
4.8.3	Coût des pneus.....	62
4.8.4	Coûts du temps et d'équipage.....	63
4.8.5	Coûts d'entretien et de la main-d'œuvre des véhicules.....	63
4.8.6	Taux d'intérêt.....	64
4.8.7	Coûts des frais généraux.....	64
4.9	Interprétation des résultats obtenus.....	67
4.10	Estimation des coûts.....	70

CHAPITRE 5	SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE.....	76
5.1	Évaluation du système de gestion de route d'après HDM-4.....	76
5.2	Principales composantes de l'analyse du projet de HDM-4.....	76
5.3	Argumentation des résultats et analyse de sensibilité.....	79
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		84
ANNEXES		
1 :	Coûts annuels à l'administration et aux usagers de la route (actualisés).....	87
2 :	Coûts annuels à l'administration et aux usagers de la route (non actualisés).....	93
BIBLIOGRAPHIE.....		99

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I Paramètres du modèle débit-vitesse par type de route.....	21
Tableau II Valeurs du modèle de consommation d'huile par défaut dans HDM-4.....	23
Tableau III Facteurs de modification du type de pneus présenté dans HDM-4.....	24
Tableau IV Données de AKMO, LIFE0 et HRWKO par défaut selon HDM-4.....	25
Tableau V Coefficients structuraux selon le catalogue des chaussées Souples du MTQ.....	41
Tableau VI Codification de matériaux des chaussées souples dans HDM-4.....	42
Tableau VII Types de fondation et matériaux codés d'après le logiciel HDM-4.....	43
Tableau VIII Codification des types de chaussées souples dans HDM-4.....	44
Tableau IX Définitions de certains défauts de surface selon HDM-4.....	46
Tableau X Valeurs par défaut du compactage d'après HDM-4.....	48
Tableau XI Seuils d'intervention d'IRI adoptés par MTQ.....	53
Tableau XII Processus d'analyse du cycle de vie des projets en HDM-4.....	56
Tableau XIII Données d'identification de la section.....	57
Tableau XIV Résumé des données d'entrée de la consommation de Véhicules selon HDM-4 pour calculer le CEV et les coûts des usagers de la route.....	66

Tableau XV	Option 1 : cour+ planage 40 mm+ resurfçage 40 mm, comparée à l'option de base; les coûts sont en millions de dollars canadiens.....	71
Tableau XVI	Option 2 : cour+ planage 40 mm + resurfçage 50 mm, comparée à l'option de base; les coûts sont en millions de dollars canadiens	72
Tableau XVII	Option 3 : cour+ planage 50 mm+resurfçage 75 mm, comparée à l'option de base; les coûts sont en millions de dollars canadiens.....	73
Tableau XVIII	Option 4 : cour+ planage 50 mm+resurfçage 90 mm, comparée à l'option de base; les coûts sont en millions de dollars canadiens.....	74
Tableau XIX	Différents coûts avec des estimations de VPN, TRI, Ratio, etc. Avec des valeurs arrondies.....	74
Tableau XX	Analyse de la sensibilité des variations du trafic en fonction du TRI_{moyen} et $VPN_{moyenne}$	81
Tableau XXI	Analyse de la sensibilité des variations des prix du carburant en fonction du TRI_{moyen} et $VPN_{moyenne}$	83

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Modèle de débit-vitesse.....19
Figure 2	Courbe empirique du AR et SFC publié dans le TRB.....30
Figure 3	Modèle du cycle de gestion de route standard en HDM-4.....32
Figure 4	Principes de calculs des bénéfices d'un type d'intervention en HDM-4.....35
Figure 5	Modèles de comportement de l'IRIe.....53
Figure 6	Évolution de l'uni (IRI) pour trois options de réhabilitation simulées et prévues en 2009 sur la rue Notre-Dame.....69
Figure 7	Évolution de l'uni (IRI) pour quatre options de Réhabilitation simulées et retenues sur la rue Notre-Dame.....70
Figure 8	TRI de chacune des options retenues en pourcentage (%).....76
Figure 9	Valeur présente nette (NPV=B-C); Investissement actualisé net (Inv. Act.); Augmentation budgétaire (C); Économie aux usagers de la route (B).....77
Figure 10	Composantes d'analyse de projet à l'aide du logiciel HDM-4.....79
Figure 11	Entrée de quelques données de la section80

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

AADT	Average annuel daily trafic
ADB	Banque de Développement Asiatique
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AKMO	Kilométrage annuel parcouru par des véhicules par défaut selon HDM-4
AN	Nombre d'accidents
AM	Mélange bitumineux
AIPCR	Association Internationale Permanente des Congrès de la Route
AQTR	Association québécoise de transport et des routes
AR	Taux d'accidents
BI	Wheel bump integrator en mm/km
CDS	Indicateur des défauts de la couche de surface
CDB	Indicateur des défauts des couches de fondation
CEV	Coûts d'exploitation des véhicules
DFID	Département de Développement International au Royaume-Uni
EC	Entretien courant
ÉCAS	Équivalent charge axiale simple
ÉTS	École de Technologie supérieure
HDS	Highway Design Study
HCH	Highway Cost Model
HDM	Highway Design and Maintenance Model
HERS	Highway Economics Requirements System
HRWKO	Nombre d'heures de travail prévues par an par véhicule
IRI	Indice de rugosité internationale en mm/Km
IRR	Taux de rentabilité interne ou taux de rendement interne
ISOHDM	Étude internationale sur le développement et la gestion des routes
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LIFEO	Durée de vie probable des véhicules selon HDM-4

MIT	Massachusetts Institute Technology
MTQ	Ministère des transports du Québec
M _R	Module réversible
PCSE	Passenger Car Space Equivalents
PMS	Pavement management system
PRR	Planage, remise en état et resurfaçage
QI	Quarter index en count/Km
QC	Code de qualité de la construction
RAC	Coûts à l'administration routière
RUC	Coûts aux usagers de la route
SFC	Coefficient de la force latérale
SHRP	Strategic Highway Research Program
SNRA	Administration Suédoise des Routes Nationales
SN	Nombre structural
SN1	Nombre structural de première couche
SN2	Nombre structural de deuxième couche, etc.
ST	Traitement de surface
TJMA	Trafic journalier moyen annuel
TRRL	Laboratoire de recherche sur les routes et transports
TRB	Transportation Research Board
VPN	Valeur présente nette

INTRODUCTION

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) et les municipalités au Québec incluant la ville de Montréal sont les gestionnaires d'une grande portion du réseau routier québécois qui a une importance capitale sur le plan socio-économique pour tous les citoyens. De ce fait, ils ont pour mission de maintenir ce précieux patrimoine dans le meilleur état possible de façon à assurer un service confortable et sécuritaire pour les usagers.

Certaines administrations ont commencé, depuis une dizaine d'années, à déployer beaucoup d'efforts pour éventuellement passer d'une gestion corrective réactive, où les besoins sont traités cas par cas vers une gestion préventive proactive où les besoins sont traités au niveau du réseau en entier et cela en prenant en considération l'évolution prévue de la détérioration de la route.

Dans cet esprit, plusieurs études ont été réalisées à l'École de technologie supérieure (ETS) pour générer des modèles de prévision du comportement futur des chaussées. Les modèles des chaussées flexibles sont basés sur le regroupement en familles des chaussées semblables par classe fonctionnelle. Les modèles des chaussées rigides reposent sur les modèles de détérioration des chaussées rigides du programme de suivi du comportement des chaussées et du programme de recherche stratégique américain en routes SHRP qui ont été adaptés aux conditions du Québec selon la procédure établie dans le logiciel HDM-4. Ce dernier est un outil de gestion des investissements routiers en matière d'entretien et de réhabilitation, préparé pour la Banque Mondiale, la Banque Européenne pour le Développement et la Banque Asiatique pour le Développement, sous l'égide de l'Association Internationale Permanente des Congrès de la Route (AIPCR) par l'équipe de l'Université de Birmingham. Celle-ci a mis beaucoup d'accent sur l'importance de certains aspects essentiels du logiciel HDM-4 dans les calculs des coûts aux usagers de la route.

Il demeure toutefois que, malgré l'orientation proactive et préventive des administrations routières au Québec, aucune administration ne dispose présentement d'un outil de gestion qui intègre également la prise en considération des coûts aux usagers qui sont parfois plus importants que les coûts d'entretien et de réhabilitation des routes.

La situation actuelle montre qu'une grande partie du réseau souffre de vieillissement (fissures polygonales), de fatigue (fissures et dépressions/ornières localisées dans les traces de roues) et de distorsions (gel/dégel, drainage).

Pour conserver la valeur de l'actif patrimonial du réseau routier provincial et municipal du Québec, il faut investir là où c'est rentable, c'est-à-dire là où un dollar en réhabilitation minimise les coûts aux usagers, les coûts d'entretien futur et ceux de réhabilitation future par plus de dollars, en visant un taux de rendement interne de 20% ou plus.

Afin de soutenir l'argumentation quant à la nécessité d'intégrer les coûts aux usagers dans la prise de décision en matière d'entretien et de réhabilitation (E&R) en démontrant la rentabilité qui peut en découler, nous avons saisi toutes les données requises pour une évaluation économique complète du tronçon de la rue Notre-Dame situé entre les rues Peel et De La montagne.

Dans le cadre de ces recherches, le recours au logiciel HDM-4 est justifié. Ce système permet d'évaluer économiquement les investissements routiers pour les routes ou les réseaux à construire ou à réhabiliter. La nouvelle version de HDM-4 est compatible aux conditions climatiques de gel et d'humidité du Québec.

Ce mémoire repose sur : 1) l'argumentation quant à la nécessité d'intégrer les coûts aux usagers dans les outils de gestion des routes au Québec; 2) la preuve du concept

proprement dit par la simulation de ces coûts et des taux de rentabilité qui ressortent de divers scénarios d'investissement en matière de réhabilitation sur le tronçon de la rue Notre Dame entre les rues Peel et De la montagne; et 3) l'établissement d'une série de recommandations pour l'inclusion des coûts aux usagers dans les outils de gestion de routes au Québec.

Le principe essentiel de la méthodologie de l'évaluation des coûts aux usagers à l'aide du HMD-4 a pour but de simuler l'impact économique de toutes les options techniques en ce qui concerne les données de conception, matériaux, qualité de construction, trafic, conditions climatiques, géométriques et environnementales, coûts de consommation des véhicules, âge de la structure de chaussée, etc. Évidemment les analyses font ressortir les options de réhabilitations les plus rentables qui répondent non seulement aux besoins des usagers de la rue Notre-Dame, mais aussi à ceux de l'administration voire la société en générale.

CHAPITRE 1

DESCRIPTION DE CE MÉMOIRE DE RECHERCHE

1.1 Objectifs du mémoire

Avec les progrès de la technologie sur le plan socio-économique, beaucoup de pays cherchent à utiliser les meilleurs outils de gestion en vue de maximiser leurs profits tout en évitant certaines dépenses inutiles, et cela est possible dans tous les domaines. Pour ce faire, les ingénieurs, les gestionnaires, les chercheurs et les administrateurs ont toujours fait face à certains défis que ce soit dans les études ou dans les exécutions des travaux. Sur ce, ils ont voulu être à l'avant-garde pour répondre non seulement à certaines exigences vitales, mais aussi au besoin de la société en générale. Il y a, depuis plusieurs décennies, le concept «coûts aux usagers » qui a fait couler beaucoup d'encre a été l'objet d'une série de discussions et de recherches dans les entreprises et les universités comme c'est le cas des équipes de recherche à l'ÉTS. Ce concept prend plusieurs orientations dépendamment du besoin de la population ou de la nature des travaux à effectuer.

Dans la présente étude, il est question de « coûts aux usagers et gestion des routes» en considérant l'analyse économique et la rentabilité des projets routiers. Ce concept n'est pas vraiment une idée nouvelle, mais il représente un défi important pour les municipalités qui veulent l'intégrer dans les systèmes de gestion en tenant compte de la réduction de CEV et les coûts d'entretien courant pour la sécurité et le bien-être de la société. Il est donc nécessaire de penser à l'état de détérioration des routes au Québec et à la qualité des interventions sur les chaussées. Il faudrait, avant toute prévision budgétaire pour la réhabilitation des routes, faire une estimation prévisionnelle du trafic en classifiant tous les véhicules en fonction de leurs caractéristiques afin de pouvoir les

utiliser convenablement dans toutes les études. Ceci pourrait grandement aider les décideurs à justifier et à améliorer les budgets de la réhabilitation des routes au Québec.

L'intégration de ce concept dans les pratiques de gestion municipale au Québec est essentielle parce que beaucoup de recherches récentes ont démontré que certains pays industrialisés et en voie de développement tels que la France, la Grande-Bretagne, l'Italie, le Japon, les Etats-Unis, l'Inde, le Brésil, l'Indonésie, le Thaïlande, le Mexique, la Pologne, le Bangladesh, etc., ont déjà utilisé les modèles de HDM-4 dans les techniques routières à des fins différentes. Ils sont parvenus à faire une classification et une comparaison du trafic en fonction de la route et de la dimension des véhicules dans leur parc d'automobile, selon certaines études réalisées par l'Université de Birmingham. Voilà l'une des raisons principales qu'il est intéressant de penser à l'évaluation des coûts aux usagers dans l'entretien et la réhabilitation des chaussées à Montréal pour bien justifier les coûts de réhabilitation des routes.

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer les coûts aux usagers par rapport aux coûts de l'administration routière sur la rue Notre-Dame à Montréal au Québec à l'aide du logiciel HDM-4, en le démontrant par ordre de grandeur numérique dépendamment de l'état de détérioration des routes. Les points spécifiques de l'étude peuvent être énoncés de la manière suivante :

- présenter le logiciel HDM-4 en tant qu'outil nécessaire à l'étude des coûts aux usagers, à l'administration et la gestion des routes;
- entreprendre une série de simulations basées sur différentes bases de données fiables et déjà validées soit par l'ÉTS soit le MTQ ou la ville de Montréal en faisant ressortir :
 - les réductions des coûts d'entretien courant et de réhabilitation;
 - les réductions des CEV à divers niveaux d'investissements;

- un dollar investi dans l'entretien et la réhabilitation des routes permet aux usagers de bénéficier en moyenne plusieurs dollars en terme d'économie;
- un taux de rentabilité interne (TRI) pouvant atteindre jusqu'à 22 % et plus selon la variation du trafic. Le but du TRI est de permettre aux investisseurs routiers de savoir la limite des taux d'intérêt ou d'actualisation acceptables dans le cadre de la réalisation d'un projet.

1.2 Présentation du mémoire

Ce projet de mémoire se divise en quatre parties principales :

- La première partie présente la méthodologie de HDM-4 et son développement dans les principes des coûts aux usagers et la gestion des routes en se basant sur des nouvelles recherches reliées à notre projet de recherche;
- la deuxième partie fait mention de la saisie des données pouvant conduire à différents coûts aux usagers, à l'administration et à la société;
- La troisième partie présente l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus. Elle tient aussi compte de la sensibilité scientifique de l'étude qui consiste à faire varier le trafic afin de contrôler, tester et prouver la véracité de résultats des différentes alternatives réalisées grâce au logiciel HDM-4.
- La quatrième partie présente les conclusions et les recommandations avec des suggestions formulées et adressées aux gestionnaires et à l'administration des routes dans leurs prises de décision concernant la nécessité d'utiliser des méthodes permettant d'intégrer non seulement les coûts administratifs, mais aussi les coûts aux usagers dans leur système de gestion afin de trouver une bonne argumentation pour justifier les budgets de réhabilitation des routes. Finalement, deux exemples en annexe sont joints à l'étude pour montrer une partie des résultats bruts qui ont aussi fait l'objet des interprétations.

1.3 Méthodologie de ce mémoire

La méthodologie du projet tient compte des différentes démarches effectuées conduisant à l'étude théorique et à l'analyse des résultats obtenus. L'étude théorique comprend :

- une revue bibliographique axée sur l'évaluation des coûts aux usagers et à l'administration des routes;
- une recherche et une analyse des données et des paramètres liés aux coûts aux usagers et à l'administration;
- des essais guidés et orientés sur HDM-4 afin de trouver les résultats escomptés.

L'analyse des résultats consiste à comparer les coûts des résultats des différentes options d'entretien et de réhabilitation simulées et retenues. Cela se fait avec des prévisions au moins pour les (20) vingt prochaines années.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE ET DÉVELOPPEMENT DE HDM-4

2.1 Historique de HDM-4

Le premier modèle HDM-4 pour l'évaluation des aspects économiques et techniques des projets d'investissements dans le domaine routier a été réalisé au cours de l'année 1968 par la Banque Mondiale. Il se produit en termes de références de la conception des routes le Highway Design Study (HDS) en collaboration avec le Laboratoire de Recherche sur les Routes et Transports (TRRL) en Grande-Bretagne et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en France.

La Banque Mondiale avait demandé à l'Institut de Technologie du Massachusetts (MIT) de construire un modèle en se basant sur les informations disponibles. Le MIT avait produit le modèle «Highway Cost Model» (HCM), qui était considéré comme une amélioration considérable par rapport aux modèles existants pour examiner les interactions entre les coûts d'investissements des travaux routiers et le CEV.

En 1976, la Banque Mondiale a développé l'analyse économique pour les investissements de la route en se référant aux modèles de performance de l'analyse de la sensibilité des variables tels le taux d'escompte et l'accroissement du trafic, d'où le travail résultant de la première version de Highway Design and Maintenance Model (HDM) par Harral et coll. (1979). Par la suite, la Banque Mondiale voyait la nécessité d'avoir un modèle plus adapté, plus compréhensif à savoir HDM-III (Watanatada et coll., 1987). En 1994, la Banque Mondiale a introduit dans le système deux modèles de développement : i) le HDM-Q était réalisé de façon à introduire les effets de congestion de trafic dans le programme de HDM-III (Hoban et coll., 1987); ii) le HDM-

manager est réalisé afin de fournir à la version de HDM-III des menus conducteurs pour les utilisateurs (Archondo-Callao et coll., 1994).

Les modèles du logiciel HDM-4 sont les produits de l'étude internationale sur le développement et la gestion des routes (ISOHDM) qui a été parrainée par la Banque Mondiale, la Banque Européenne pour le Développement International, la Banque de Développement Asiatique, l'Administration Suédoise des Routes Nationales (SNRA) et autres. Les produits de HDM-4 sont conjointement publiés par l'AIPCR, Paris, et la Banque Mondiale à Washington.

L'AIPCR est fondée depuis 1909 et compte 104 membres gouvernementaux et 2000 membres répartis à travers 130 pays. Elle coordonne les assistances techniques et les possibilités en formation apportée aux utilisateurs de HDM-4. Elle se veut être aussi la première source d'information en matière de route et a assumé le rôle de gestionnaire dans les activités internationales de l'exécution HDM-4 dans le projet d'ISOHDM. Par ces activités, elle accomplit et détermine un système de tests, de distributions commerciales, de normes et programmes. La diffusion de l'information est le point essentiel pour favoriser des applications efficaces du système et identifier des efforts continus afin de coordonner la recherche et le développement de l'information en gestion des routes.

2.1.1 Objectifs de développement de HDM-4

Beaucoup de modèles ont été largement utilisés dans certains pays européens comme instruments pour justifier l'augmentation de budgets de la réhabilitation et l'entretien des routes en vue d'optimiser les bénéfices économiques aux usagers de la route sous différents niveaux de dépenses. En fournissant des outils nécessaires à l'analyse des investissements routiers, plusieurs pays industrialisés ont fini par utiliser le modèle comprenant entre autres :

- les effets de congestion du trafic;
- les effets du climat;
- une grande variété de structures et types de chaussées;
- la sécurité routière en tenant compte des impacts environnementaux, la consommation énergétique et les émissions annuelles des véhicules.

2.2 Structure de HDM-4

La structure de HDM-4 repose généralement sur quatre principaux domaines d'application :

- analyse de la planification stratégique;
- analyse de la programmation des travaux routiers;
- analyse des projets routiers;
- études de recherche et de politique.

2.2.1 Analyse de la planification stratégique

L'emploi de cette application pour la planification stratégique est de préparer des évaluations à moyen et à long termes, des besoins de développement, de construction, de réhabilitation et d'entretien de la route, et de la voirie. Cette dernière est caractérisée par la longueur de la route dans les différentes catégories définies par les paramètres tels que la classe de route, les liens, les sections, les nœuds, le type extérieur, l'état des trottoirs, le chargement en terme de trafic. Les évaluations du budget à moyen et à long termes pour l'ensemble du réseau sont des prévisions pour les effets des usagers de la route.

2.2.2 Analyse de la programmation des travaux routiers

À l'intérieur de ce domaine d'application, on prépare des programmes de travaux auxquels les sections de route sont identifiées avec des options d'entretien ou d'amélioration. Le logiciel HDM-4 calcule la valeur présente nette (VPN) et des estimations de dépenses de chaque option. L'objectif principal de l'analyse de la programmation est d'accorder une priorité aux meilleures utilisations du budget surtout en cas de contraintes budgétaires.

2.2.3 Analyse des projets routiers

Les applications au niveau de projet sont définies pour évaluer un ou plusieurs projets d'investissement des routes. Les analyses de l'évaluation d'une section de route avec des traitements proposés par les utilisateurs nous permettent de dresser une estimation sur les coûts et les bénéfices projetés annuellement sur une période d'analyse. Les indicateurs économiques sont déterminés pour les différentes options d'investissement. Les analyses de projets peuvent être utilisées pour estimer la viabilité économique des projets en considérant les diverses interventions prévues sur la période d'analyse comme celle du cycle de vie de la construction, l'entretien et/ou les effets d'amélioration ainsi que les évaluations des coûts aux usagers de la route. Les principales fonctions de l'analyse des projets routiers sont :

- les prévisions annuelles de l'évolution des paramètres de la construction de la route;
- les effets d'amélioration et d'entretien de la route;
- les coûts et les avantages aux usagers de la route;
- la évaluation des effets environnementaux;
- la performance structurale des chaussées;
- les prédictions du cycle de vie des projets routiers;

- les bénéfices et les coûts aux usagers de la route;
- les comparaisons économiques des projets alternatifs.

2.2.4 Études de recherche et de la politique

On utilise HDM-4 pour entreprendre un certain nombre d'études de la politique de gestion des routes comprenant :

- les frais d'utilisation pour les fonds d'entretien de la route;
- les impacts sur les modifications de transports routiers sur la consommation énergétique;
- les impacts sur les limites de chargement;
- les normes d'entretien et de réaménagement des trottoirs.

2.3 Gestion des données

La base de données HDM-4 fournit les installations de base pour pouvoir emmagasiner toutes les caractéristiques des chaussées étudiées. Les utilisateurs peuvent définir plusieurs classes de route, de réseaux avec des sections illimitées ainsi que les trottoirs. Le système HDM-4 repose sur le principe liens-nœuds, section-branche. Cette approche de mise en référence du réseau est conçue afin d'intégrer un ensemble de conventions utilisées dans les autres bases de données avec lesquelles le logiciel HDM-4 peut être connecté.

La base de données HDM-4 fournit des équipements nécessaires pour effectuer le stockage des caractéristiques des différents types de véhicules. Le logiciel HDM-4 exige, entre autres, les vitesses de véhicules, des frais d'exploitation, le temps de passage, etc. Plusieurs parcs de véhicules peuvent être fournis au système pour dresser des analyses basées sur un éventail de données qui peuvent être enregistrés par l'utilisateur, en ayant recours à celles disponibles par défaut du système.

Le modèle de configuration HDM-4 peut être utilisé pour être adapté à toutes les composantes et aux besoins de l'utilisateur. Les données par défaut et les coefficients de calibrage peuvent être définis de manière à être modifiés par les utilisateurs de n'importe quel pays ou ville.

Le logiciel HDM-4 dispose des systèmes d'informations à travers des fichiers importés et permet de les réexporter. Les données importées et les fonctions d'exportations établies dans les applications HDM-4 peuvent être employées pour échanger des données avec les bases de données externes en utilisant des procédures standardisées de transfert de données.

2.3.1 Rôle de HDM-4 dans la gestion de route

Le système HDM-4 a été conçu avec une structure modulaire permettant de réaliser une intégration avec les systèmes de gestion de chaussées. Les rapports techniques établis dans HDM-4 sont contenus dans les bibliothèques Windows qui peuvent être incorporés dans le système d'entretien des chaussées existantes de façon qu'un ensemble de modèles de détériorations de route puisse être inséré dans le système.

Le système HDM-4 fournit un certain nombre de rapports techniques nouveaux et améliorés tels que :

- la détérioration de trottoirs incluant les trois classes de trottoir, non revêtus, en béton bitumineux et en béton rigide;
- les travaux routiers comprenant :
 - a) l'entretien courant ou de routine par exemple, scellement de fissures;
 - b) l'entretien périodique par exemple, le planage et le resurfaçage;
 - c) le développement incluant l'élargissement de chaussées, le réaligement et la construction de nouvelles sections de route;

- les caractéristiques suivantes sont incluses dans le calcul des coûts aux usagers, à savoir :
 - 16 types de véhicules de base représentatifs avec des possibilités de modifications par les utilisateurs;
 - les modèles de vitesse de véhicules dans les conditions de la congestion du trafic, les interactions entre le volume de trafic et les vitesses;
 - les modèles améliorés de la consommation du carburant, de l'usure de pneu, de l'utilisation des pièces de rechange, des travaux d'entretien et la dépréciation de véhicule;
 - le calcul des avantages exogènes;
 - le calcul du temps de voyage pour les passagers et des marchandises en transit;
 - les effets sur les véhicules du transport non motorisés et les modèles de frais d'exploitation;
- les caractéristiques suivantes sont incluses dans les modèles liés aux effets de la sécurité routière, la consommation d'énergie et l'environnement :
 - les coûts d'accidents dans le cadre de l'analyse économique en utilisant des taux d'accidents et les coûts pour chaque type d'accidents;
 - des modèles de consommation d'énergie introduits pour estimer la consommation totale d'énergie du cycle de vie, en termes de sources d'énergies nationales et globales;
 - des rapports d'émissions de véhicule ajustés en vue d'estimer des quantités de substances particulières, d'hydrocarbures et de gaz comme le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (Nx), les dioxydes de carbone et le plomb.

2.3.2 Modèles utilisés en HDM-4

Beaucoup de modèles ont été utilisés en HDM-4, citons à titre d'exemple :

- les modèles de détériorations de la route;
- les modèles des coûts aux usagers de la route;
- les modèles d'entretien, de réhabilitation, de construction et reconstruction de la route;
- les modèles des effets socio-environnementaux;
- les modèles des analyses économiques.

Pour nous, il s'agit d'évaluer les coûts aux usagers et ceux de l'administration des routes sur un tronçon de la rue Notre-Dame à Montréal tel qu'indiqué plus haut, suivant son état actuel. Sur ce, en vue de compléter le travail, nous prendrons les modèles des coûts aux usagers de la route pour procéder de la façon suivante après avoir ajusté certains paramètres en vue d'une parfaite adaptation avec le milieu québécois:

- une étude de faisabilité en vue d'inventorier les techniques possibles qu'on devrait appliquer sur ce tronçon en fonction des procédures d'estimations de coûts;
- une étude de définition aux différentes questions concernant le projet et les options technologiques avec des estimations de prix en faisant des examens plus approfondis de la solution la plus rentable et intéressante possible;
- évaluer les coûts d'exploitation des véhicules circulant sur la rue Notre-Dame d'après l'état de la chaussée après avoir contacté certains responsables et administrateurs de la ville de Montréal en matière de route soit par contact direct soit par téléphone ;

- faire certaines estimations des coûts d'exploitation des véhicules circulant sur cette rue selon le contexte nordique après avoir consulté des concessionnaires et garagistes afin d'élaborer et comparer les coûts;
- simuler les réductions des CEV en se basant sur les différentes composantes de la réhabilitation avec des arguments viables, etc.

2.3.3 Coûts aux usagers de la route

Le coût aux usagers de la route se divise en plusieurs composantes qui sont représentées comme suit :

- coût d'exploitation des véhicules en transport motorisé;
- coût du temps de voyage des véhicules en transport motorisé ;
- coût d'exploitation et temps de voyages du transport non motorisé;
- coût d'accident, s'il y a lieu.

Dans le logiciel HDM-4, on définit le coût aux usagers de la route pour une option d'investissement quelconque comme la somme des coûts de tous les usagers circulant sur un tronçon considéré.

2.3.3.1 Coûts d'exploitation et les vitesses des Véhicules

Beaucoup de modèles ont utilisés pour calculer les coûts d'exploitation des véhicules, le temps de voyage, et les vitesses des véhicules. Ils fournissent une vue d'ensemble sur la logique des modélisations et une description des relations existant entre les différents modèles et les valeurs des paramètres par défaut pour chaque composante des véhicules représentatifs dans le logiciel HDM-4. Watanatada et Harral (1987) donnent des informations générales et détaillées en fournissant quelques modélisations dans l'application de HDM-4.

2.3.3.2 Concepts de modélisations

Dans HDM-III, Watanatada et Harral (1987) ont utilisé jusqu'à 10 véhicules représentatifs dans les analyses simples; mais HDM-4 devient plus flexible, car il présente un nombre de véhicules représentatifs plus importants qu'on peut utiliser dans les analyses. L'utilisateur du logiciel HDM-4 pourrait définir un nombre de 16 types de véhicules motorisés représentatifs. Ceci permet à l'utilisateur de ce modèle d'assigner certaines caractéristiques fondamentales de chaque type de véhicules, d'après ce qui suit : i) le nombre d'essieux et de pneus, la surface frontale projetée, etc.; ii) les caractéristiques de la performance telles que la force motrice et la force de freinage; iii) durée de vie et la valeur résiduelle.

2.3.3.3 Paramètres de la modélisation primaire

Les données de base qui se regroupent en différentes caractéristiques de véhicules pour la modélisation des effets aux usagers peuvent être représentées comme suit :

- les données de la géométrie de la route telles que les alignements, les vitesses, les facteurs de frictions latérales, la longueur et la largeur des sections, le nombre de voies, etc.;
- les rapports entre la circulation et les vitesses, auxquels s'ajoutent la capacité de la route et les paramètres déterminant des vitesses d'exploitation des véhicules y compris les caractéristiques de la circulation à différents niveaux de trafic;
- un schéma du réseau de trafic dans lequel est inclus l'utilisation routière en termes de la distribution du trafic horaire et les espaces équivalents en voitures passagères (PCSE/h) durant la période de trafic;
- les données de l'uni et la texture de la surface de la chaussée, qui sont obtenues à partir des résultats du modèle de la dégradation de la route;

- le trafic spécifié en termes de TJMA (AADT), de sa composition et de ses taux d'accroissement pour chaque section de route;
- pour les coûts unitaires, il y a des coûts pour toutes les composantes des véhicules par exemple, le coût du carburant par litre, le prix de nouveaux véhicules, le prix des pneus, le prix de main-d'œuvre, etc.

2.3.3.4 Procédure informatisée

La procédure informatisée pour la modélisation des vitesses de véhicules motorisés, des coûts d'exploitation, du temps de voyages sur une section alternative par un type de véhicules dans une année d'analyse, peut être résumée la façon suivante :

1. le calcul des composantes de vitesse du véhicule comme les données pour déterminer les coûts d'exploitation des véhicules et le temps de passages sur une section donnée doit se faire en considérant les valeurs suivantes :
 - a) la vitesse à vide;
 - b) la vitesse de congestion c'est-à-dire les vitesses à différents niveaux de circulation;
 - c) la vitesse d'exploitation moyenne annuelle;
 - d) la vitesse du trafic moyen annuel sollicitée comme les données du modèle de dégradation de la route;
2. le calcul des ressources d'exploitation des véhicules se fait en utilisant les composantes suivantes :
 - a) le carburant;
 - b) l'huile lubrifiante;
 - c) les pneus;
 - d) les pièces de rechange;
 - e) les heures de travail;
 - f) les coûts capitaux (incluant la dépréciation et l'intérêt);

- g) la main-d'œuvre;
 - h) les frais généraux;
3. le calcul des heures de voyages durant le temps de travail;
 4. les coûts de ressources de véhicules en appliquant les coûts unitaires aux quantités prévues des ressources consommées;
 5. le calcul de l'augmentation du coût d'exploitation dû aux réductions de voyages à cause des routes endommagées;
 6. la récapitulation, le stockage et le reportage des données pour les analyses subséquentes.

2.4 Modèle de congestion de débit-vitesse

Le modèle débit-vitesse adopté pour le transport motorisé est divisé en trois parties (Hoban, 1994). Ce modèle est illustré dans la figure ci-après :

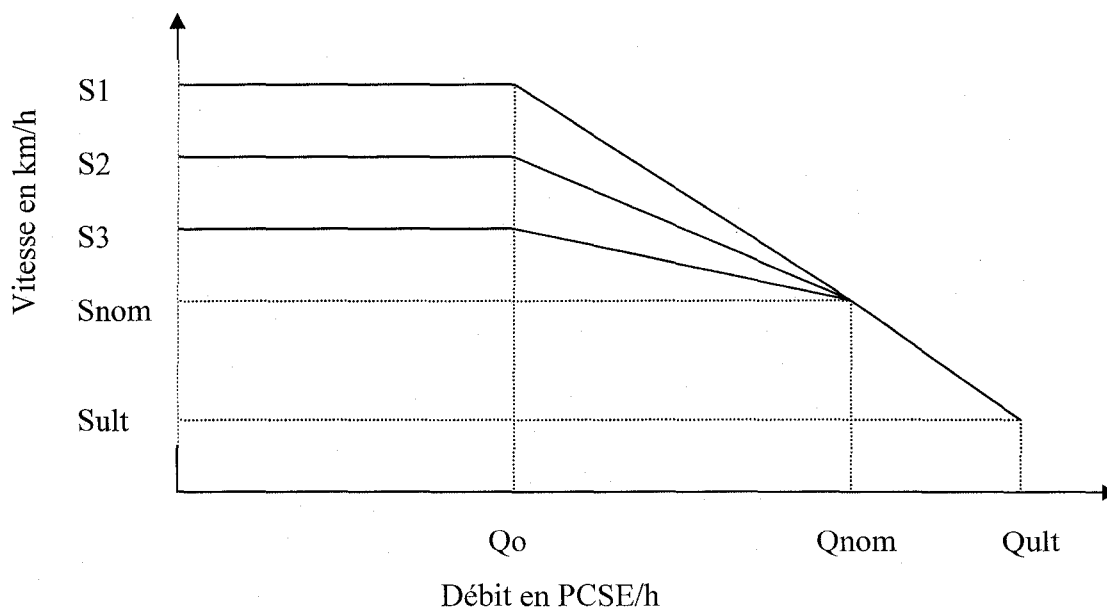


Figure 1 Modèle de débit-vitesse
Source : Hoban et coll. (1994)

Ce modèle illustré à la figure 1 est adopté pour le transport motorisé. Il est divisé en trois zones d'après (Hoban, et coll., 1994). Pour l'expliquer, il suffit de définir les notations qui lui sont appliquées comme suit :

Qo	:le niveau de la circulation en dessous duquel, les effets du trafic sur les véhicules en termes d'espaces équivalents en voitures légères (PCSE/h), sont négligeables;
Qnom	:la capacité nominale du trafic de la route en PCSE/h;
Qult	:capacité ultime du trafic de la route pour une circulation stable en PCSE/h;
Snom	:la vitesse à la capacité ultime, référée aussi à la vitesse d'embouteillage en Km/h;
S1 à S3	:la vitesse de la circulation fluide pour les différents types de véhicules en Km/h;
PCSE	:les espaces équivalents en voitures passagères (passenger car space équivalents).

Hoban, Reilly et Archondo-Callao (1994) expliquent que l'utilisation des paramètres de ce modèle-là dépend généralement du type et de la largeur de la route. Les valeurs recommandées pour ces paramètres sont listées dans le tableau I. Les valeurs de Qo et Qnom sont exprimées en fonction de la capacité ultime du trafic. Hoban, Reilly et Archondo-Callao (1994) suggèrent que la vitesse nominale est égale à 85% de la vitesse à vide.

Tableau I

Paramètres du modèle débit-vitesse par type de route

Type de route	Largeur (m)	$XQ1 = \frac{Qo}{Qult}$	$XQ2 = \frac{Qnom}{Qult}$	Qult PCSE/h	Sult Km/h	Acc. Max m/s^2
Route à une voie simple	< 4	0,0	0,70	600	10	0,75
Route intermédiaire	4 à 5,5	0,0	0,70	1 800	20	0,70
Route à deux voies	5,5 à 9	0,1	0,90	2 800	25	0,65
Route à plus de deux voies	9 à 12	0,2	0,90	3 200	30	0,60
Route à quatre voies	> 12	0,4	0,95	8 000	40	0,60

Source: Valeurs utilisées dans le logiciel HDM-4 pour connaître la capacité admissible d'une voie selon Bennett et Greenwood (1996)

La vitesse correspondant à la capacité nominale est égale à 85% de la vitesse à vide du type de véhicule le plus lent. Elle est calculée en prenant la vitesse moyenne suivant les deux directions. Dans notre cas, en raison du manque de visibilité au voisinage des nœuds et puisqu'il s'agit d'une zone urbaine, on adopte la limite de vitesse fixée par la ville de Montréal.

2.4.1 Effets d'accélération et décélération

Le modèle de débit-vitesse présenté dans la figure 1 montre que, lorsqu'il y a augmentation du volume du trafic, il y a une augmentation dans les interactions entre les véhicules et la réduction de vitesse. Les interactions sont accompagnées d'une augmentation de la fréquence et la magnitude de décélérations et d'accélération des véhicules. C'est autour de cette théorie que le modèle de congestion a été construit.

La magnitude des interactions des véhicules est représentée par son accélération, laquelle est définie comme une déviation de l'accélération totale pour un type de véhicule pendant la période de trafic.

La consommation spécifique du carburant en millilitres par 1 000 véh./km sur une section de route où la circulation se fait en deux sens ou en sens unique est déterminée par Bennett et Greenwood (1996) dont les valeurs ont été adoptées par défaut dans HDM-4.

Le modèle de la consommation d'huile par type de véhicule à chaque période de trafic est calculé et adapté en fonction de la distance parcourue selon des estimations réalisées par Bennett et Greenwood (1996); ils ont présenté un tableau résumant les valeurs de la consommation d'huile.

Tableau II

Valeurs du modèle de consommation d'huile par défaut dans HDM-4

Type de véhicule	Distance parcourue à chaque changement d'huile (km)	Capacité du moteur (l)	Perte d'huile due à l'exploitation OILOPER
Motocyclette	5 000	2,0	0,0014
Voitures passagères	10 000	4,0	0,0028
Véhicule de transport légers, Minibus, 4WD	7 500	5,0	0,0028
Camions moyens et légers	7 000	14,0	0,0021
Camions articulés et lourds	9 000	31,0	0,0021
Autobus moyen et légers	8 000	14,0	0,0021
Autobus lourds et coach	8 000	20,0	0,0021

Source: Valeurs utilisées dans le logiciel HDM-4
(Bennett et Greenwood, 1996)

Le modèle de la consommation de pneus est basé sur la théorie énergétique. Watanatada et coll. (1987) prétendent que la consommation de pneus d'un véhicule est proportionnelle au besoin énergétique. La consommation de pneus est fonction des nouveaux pneus consommés par 1 000 véh./km. Le taux de consommation de pneus est calculé de manière séparée c'est-à-dire on considère les deux directions dans la circulation, puis on prend la moyenne de ces deux valeurs obtenues sur la section de la route considérée. La consommation totale de pneus exprimée en termes du nombre équivalent de caoutchoucs neufs consommés par 1 000 véh./Km par type de véhicule, à

chaque période de trafic, est calculée au moyen de la consommation moyenne annuelle de pneus consommés par 1 000 véh. /Km par type de véhicule.

Harrison et Aiz, (1998) ont recommandé de faire certains ajustements dans le modèle de la consommation de pneus c'est-à-dire les valeurs de l'uni (IRI) modifiées en fonction du type de pneus et de routes.

Tableau III

Facteurs de modification du type de pneus présenté dans HDM-4

Type de pneus	Routes pavées	Routes non pavées	
		IRI ≤ 6m/km	IRI ≥ 6m/km
Bias	1,00	1,00	1,00
Radial	1,20	1,20	1,00

Source : (Harrison et Aziz, 1998)

Dans le logiciel HDM-4, on fournit les valeurs du modèle d'utilisation de 16 types de véhicules par défaut dans un tableau avec le kilométrage annuel (AKMO), la durée de vie probable (LIFE0), le nombre d'heures de travail par an (HRWKO). La valeur de l'utilisation d'un véhicule est exprimée en termes du nombre de kilomètres parcourus durant un laps de temps (Hine, 1996)

Tableau IV

Données de AKMO, LIFE0 et HRWKO par défaut selon HDM-4

N° Véh.	type de véhicule	AKMO (Km/année)	LIFE0 (Année)	HRWKO (Heures/ année)
1	Motocyclette (Motor cycle)	10 000	10	400
2	Voitures légères (Small car)	23 000	10	550
3	Voitures moyennes (Medium car)	23 000	10	550
4	Voitures (Large car)	23 000	10	550
5	(Light delivery vehicle)	30 000	8	1 300
6	(Light goods vehicle)	30 000	8	1 300
7	4x 4 (Four wheel drive)	30 000	8	1 300
8	Camion léger (Light truck)	30 000	8	1 300
9	Camion moyen (Medium truck)	40 000	12	1 200
10	Camion lourd (Heavy truck)	86 000	14	2 050
11	Camion articulé (Articulated truck)	86 000	14	2 050
12	Minibus (Minibus)	30 000	8	750
13	Bus léger (Light bus)	34 000	8	850
14	Bus moyen (Medium bus)	70 000	7	1 750
15	Bus lourd (Heavy bus)	70 000	12	1 750
16	Coach	70 000	12	1 750

Source : Valeurs utilisées dans le logiciel HDM-4 (Hine, 1996)

Les méthodes suivantes ont été utilisées dans HDM-4 pour calculer les coûts de dépréciation des véhicules à savoir: i) la méthode de la valeur résiduelle en considérant l'uni (IRI) de la route et la durée de service; ii) la méthode de dépréciation constante

en mettant en cause les prix des véhicules moins les coûts des caoutchoucs et la vitesse d'exploitation des véhicules durant les période de trafic; iii) la méthode de dépréciation optimale en utilisant la prédiction de la durée de vie optimale. Une estimation de main-d'œuvre et des frais généraux ont été faite en vue d'une modélisation en fonction du trafic.

2.4.2 Concepts de modélisation du transport non motorisé

Vu l'importance du transport non motorisé dans le déplacement des gens et des marchandises dans le monde c'est-à-dire dans les pays en voie de développement comme dans les pays développés, on ne pourrait pas exclure l'effet et la présence de ces types de véhicules tels que les piétons, les bicyclettes, les charrettes etc., dans une section donnée. De ce fait, l'inclusion du transport non motorisé dans l'évaluation des projets est vraiment essentielle. Cependant, cette présence peut influencer la vitesse du transport motorisé tout en affectant le coût d'exploitation des véhicules motorisés. De plus, la réhabilitation de la route influencera les coûts et les bénéfices du transport motorisé. Les différents types de réhabilitation de route qui nécessitent directement les coûts et les bénéfices aux usagers du transport non motorisé sont :

- l'additionnement des voies du Transport non motorisé;
- la désignation des accotements pour le transport non motorisé;
- l'élargissement des chaussées;
- l'amélioration de la condition de la surface de la chaussée;
- l'amélioration des caractéristiques de la géométrie routière;

Ces améliorations seraient affectées par la performance des caractéristiques du transport non motorisé; ainsi les coûts et les bénéfices aux usagers seront considérés en termes suivants :

- le temps et la vitesse de voyages;
- le degré de conflits avec le trafic du transport motorisé;
- le taux d'accidents.

Les données requises pour la modélisation du transport non motorisé peuvent être regroupées comme suit :

- les caractéristiques physiques de transport, par exemple le poids d'exploitation et le type de pneus;
- l'utilisation du transport non motorisé, la durée de vie, le nombre de kilomètres parcourus durant une année et le nombre d'heures de travail;
- les coûts unitaires tels que le prix d'achat, le taux d'intérêt, la main-d'œuvre, le coût énergétique, le coût de voyage, le coût de réparation et d'entretien etc.;
- les caractéristiques de la route tels la longueur, l'alignement vertical et la condition de surface;
- le modèle de calibrage des paramètres;
- les données de trafic en termes de TJMA (AADT), la composition de trafic et le taux d'accroissement.

Pour chaque section donnée, l'estimation des bénéfices nets en terme d'économie aux usagers en transport non motorisé est calculée de façon séparée pour le trafic normal, dévié et généré. La méthode d'analyse économique définit en détails les paramètres de cette analyse en termes de coûts d'exploitation et le temps du transport non motorisé par type de véhicule sur un tronçon de route.

2.5 Sécurité routière

Beaucoup d'auteurs ont déjà démontré qu'il y a une forte corrélation entre les conditions de chaussées et la sécurité routière. Pour faire une évaluation globale sur les effets d'amélioration de la sécurité du réseau routier, il est important de mettre en place des moyens de surveillance dus aux travaux d'entretien de chaussées. Les résultats de ces évaluations peuvent être utilisés par l'administration des routes, qui a effectué des entretiens dans le but de réduire les coûts et le taux d'accidents. Selon un article publié dans le journal du TRB présenté par Cafiso, Di Graziano, Kerali, & Odoki (2002), le facteur de réduction du taux d'accidents est défini comme le rapport de $v = \lambda / \pi$ où π est la valeur moyenne du nombre d'accidents attendus dans la période après, si l'intervention n'a pas été effectuée, et λ est la valeur moyenne du nombre d'accidents attendus dans la période suivant la réalisation de l'intervention.

L'estimation de v est une opération complexe qui peut être conduite aux études avant et après sur les sites avec les caractéristiques similaires parce que les informations ne sont pas toujours disponibles. La plupart des études ont démontré une relation entre le taux d'accidents (AR) et le coefficient de la force latérale (SFC) selon (Cafiso et coll., 2002). La valeur absolue du taux d'accidents dépend des caractéristiques de la route locale telles que la géométrie, la visibilité, le trafic et les conditions environnementales. La courbe de la figure 2 ci-après définit le pourcentage du taux d'accidents en fonction de du coefficient de la force latérale. La valeur attendue de AR_{isj} , dans une section homogène i pour une alternative s et l'année j , après une variation de résistance due au dérapage est déterminée par l'équation ci-dessous (référence: Cafiso et coll., 2002).

$$AR_{isj} = \frac{AR_{i0}}{AR_0} \cdot AR_{sj} \quad (2.1)$$

Où :

AR_{i0} : taux d'accidents trouvé sur une section homogène en fonction de SFC_{i0} dérivé de l'étude;

AR_0 : taux d'accidents obtenu à partir de la courbe expérimentale correspondant à la valeur SFC_{i0} ;

AR_{sj} : taux d'accidents obtenu de la courbe expérimentale correspondant à la valeur de SFC_{isj} .

Pour déterminer l'indice de sécurité des différentes alternatives proposées, on cherche une relation entre les valeurs de résistance au dérapage calculées dans les modèles de détérioration de HDM-4 et la courbe empirique. Le nombre d'accidents (AN_{is}) dans une section i pour une alternative s (référence: Cafiso et coll., 2002)., est donné par la formule suivante :

$$AN_{is} = \sum_{j=i}^n \frac{AR_{isj} \cdot Lt \cdot TJMA_{ij}}{10^8} \quad (2.2)$$

Où :

AN : nombre d'accidents;

Li : longueur de la section i;

t : intervalle de temps (365 jours), car HDM- 4 utilise 365 jours;

AR_{isj} : nombre d'accidents correspondant à la valeur de la résistance au dérapage calculée dans HDM-4;

$TJMA_{ij}$: TJMA (AADT) pour la section i à l'année d'analyse j ($j = 1, \dots, N$).

L'inverse de la sommation de AN , durant le cycle de vie de la chaussée, pour les projets, définit la valeur de la sécurité pour chaque alternative.

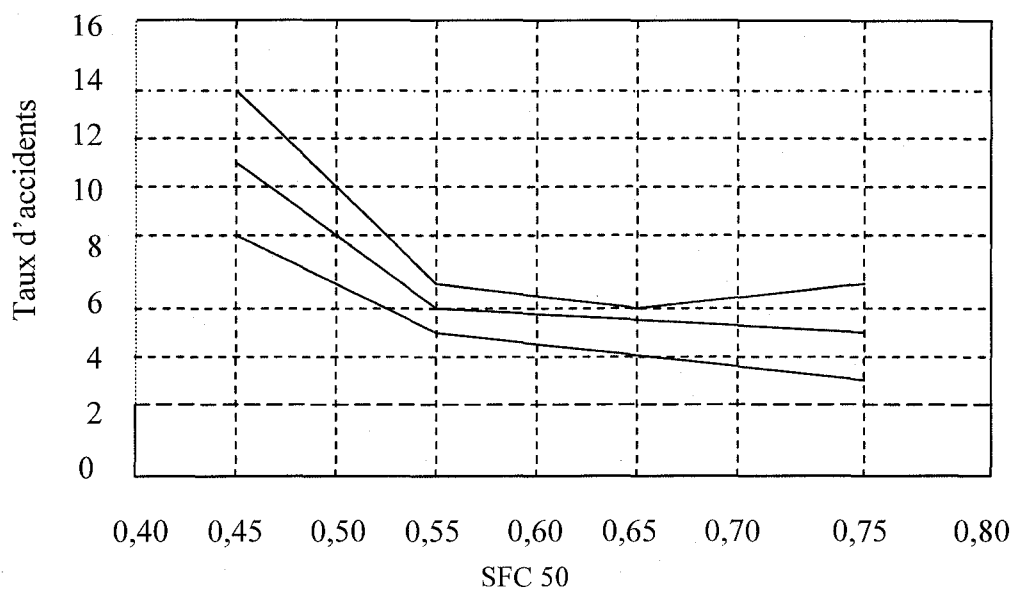


Figure 2 Courbe empirique du AR et SFC publié dans le journal de TRB (Cafiso et coll., 2002)

2.6 Évaluation économique des projets routiers

Le but de l'évaluation des investissements routiers est de sélectionner des projets avec des recettes économiques élevées ou de déterminer combien pourrait-on investir et quelles recettes économiques qu'on aimerait attendre. Le degré d'investissement est déterminé par des coûts de construction et d'entretien annuel de route. Les recettes économiques se trouvent principalement dans l'économie dans les coûts aux usagers de la route, due à la provision de la meilleure utilisation routière. Ces coûts constituent ce qu'on appelle le coût du cycle de vie toute entière.

Les objectifs primaires de l'évaluation peuvent être identifiés comme suit :

- déterminer le niveau approprié de l'investissement et les recettes attendues à partir de cet investissement;
- déterminer la conception structurale et géométrique appropriée pour le niveau d'investissement afin d'obtenir les recettes souhaitées;

- déterminer les priorités relatives dans l'investissement des projets routiers lorsqu'il y a de contraintes budgétaires;
- évaluer les impacts économiques et socio-économiques dans les projets routiers tels que les améliorations apportées à la communauté, à l'industrie, à l'agriculture, à l'éducation et aux services de santé.

Cependant, certaines évaluations socio-économiques sont difficiles à quantifier en termes monétaires. La fonction primaire de l'évaluation du modèle d'investissement routier est de calculer les coûts de la construction, de l'entretien et aux usagers pour une période d'analyse spécifique en fonction de la politique de gestion des routes.

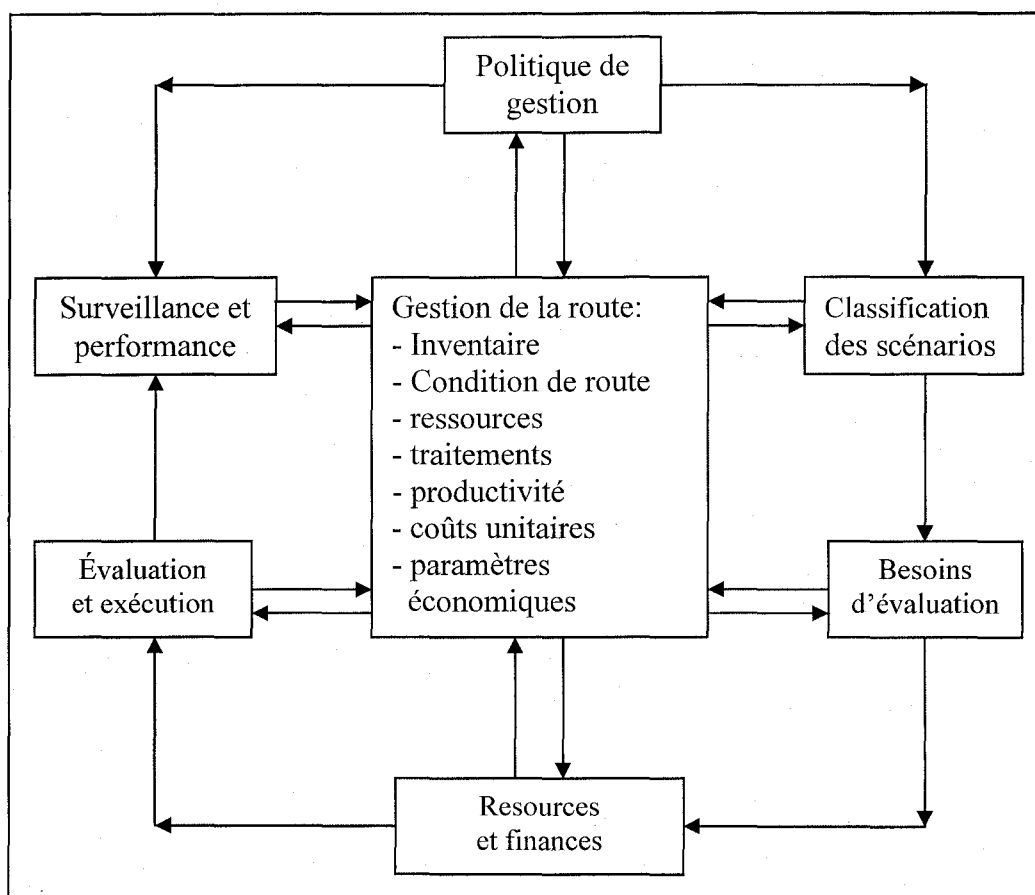


Figure 3 Modèle de cycle de gestion de Route standard en HDM-4
Source : (Henry et coll., 2000)

Lorsqu'on planifie certains projets d'investissement dans le domaine routier, il est nécessaire d'évaluer tous les coûts associés à ces projets à savoir les coûts de construction, d'entretien et de réhabilitation; les coûts aux usagers et tous les autres coûts externes ou les bénéfices qui peuvent être directement attribués à ce projet.

Cependant les coûts aux usagers sont bornés par la communauté sous forme de CEV, de coûts de voyage, d'accidents et autres coûts indirects.

L'évaluation économique effectuée dans les modèles d'investissement des coûts de transport est basée sur les coûts annuels générés pour la construction, l'entretien et des usagers de la route.

Le coût de la construction de la route est calculé à partir de la somme des coûts de la préparation du site, des fortifications de sol, des chaussées, et des structures de ponts et drainage; et les frais généraux.

La dégradation de la route est modélisée en terme du nombre de défauts incluant ; l'uni, la fissuration, l'orniérage, l'arrachement, les nids de poules, la perte de gravier dans le cas d'une route non revêtue etc. Le taux de la dégradation est fonction de la conception de chaussée initialement dimensionnée, du trafic, du chargement et les effets environnementaux.

La performance de la chaussée est grandement modélisée en fonction de plusieurs facteurs. Les deux plus importants sont :

- la portance de la chaussée qui est représentée par le nombre structural (SN) est définie par la relation empirique dans laquelle l'épaisseur et la raideur de chaque couche de chaussée sont combinées en utilisant la somme de leur

produit. La raideur de la couche de la chaussée dépend principalement du type et de la qualité des matériaux qui composent la structure;

- l'uni (IRI) est le second paramètre important utilisé dans la modélisation de la performance de la chaussée. Il est utilisé dans le calcul des coûts aux usagers de la route, plus précisément le CEV. La performance de l'uni est mesurée en utilisant l'un des trois systèmes suivants :
 - Wheel bump integrator (BI) en mm/km;
 - Quarter index (QI) mesuré en count par km;
 - Indice de rugosité international (IRI) en m/km ou mm/km;

La Banque mondiale permet d'utiliser des relations telles que « $BI = 55 * QI$ », « $BI = 630 * IRI^{1.12}$ » et « $BI = 900 IRI - 1000$ » pour faciliter la conversion d'un système à l'autre. On se sert de l'uni (IRI) en mm/km dans notre étude comme c'est le cas le plus courant en Amérique du Nord.

2.6.1 Analyse de la période budgétaire

Une analyse de la période budgétaire est une simplification de l'analyse du cycle de vie en appliquant des travaux assignés dans une période budgétaire en cours ou en reportant les travaux jusqu'à la première année de la prochaine période budgétaire.

Le calcul économique se fait en comparant les investissements de la première année de la période budgétaire à la première année de la prochaine période budgétaire différée, par exemple un resurfaçage appliqué dans cette année à comparer à une action à la prochaine période budgétaire.

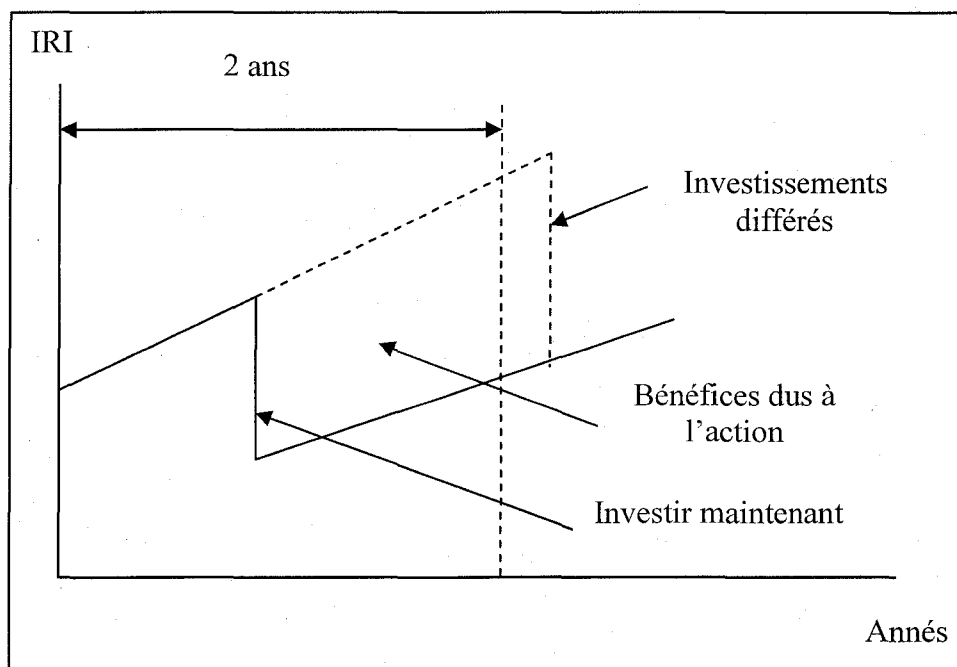


Figure 4 Principes de calculs des bénéfices d'un type d'intervention dans HDM-4; approche utilisée en United States Highway Economics Requirements System (HERS) et UK Highway Agencies PMS

2.6.2 Analyse de la rentabilité des projets

Les principes de l'analyse de rentabilité des projets date du 18^e siècle, mais à partir de 1920, on commençait à mettre en évidence la notion d'intérêt composé pour pouvoir comparer les projets entre eux. Au cours des deux dernières décennies, certains écrits ont mis l'accent sur une approche normalisée des études d'analyse économique sous certitude. Cette approche est aussi appelée analyse de rentabilité sous certitude.

Le but de cette gestion consiste à identifier les ressources économiques disponibles afin de maximiser la VPN en tant que la différence entre les entrées et sorties de fonds économiquement parlant. Dans l'évaluation de l'analyse économique des projets routiers, les bénéfices sont dérivés principalement des économies aux usagers de la

route et aussi à l'entretien. La comparaison des différentes alternatives demande une décision d'investir à partir de plusieurs types d'analyse des projets. Les critères les plus utilisés pour sélectionner des projets sont la VPN et le taux de rentabilité interne (TRI). Si le taux de rentabilité est nettement supérieur au taux d'intérêt escompté ou le taux d'actualisation, on peut dire que le projet est vraiment rentable.

2.6.3 Coûts économiques et financiers

Le coût financier d'un projet est la somme des prix du marché de matériaux, de main-d'œuvre, des équipements, des travaux et des frais généraux encourus dans la construction du projet avec les taxes. L'évaluation économique des projets routiers doit être effectuée en utilisant les coûts économiques qui représentent le coût réel du projet dans l'économie d'un pays. Par exemple, le prix du marché du carburant dans la plupart des pays a un pourcentage de taxe gouvernemental. Le prix économique du carburant serait estimé à partir du prix de marché moins les taxes. Dans la plupart des cas, le coût économique du carburant sera moins que le coût financier.

2.6.4 Possibilités de risque

Tous les projets routiers impliquent quelques degrés d'incertitudes dans leur issue. La décision de procéder à un projet inclut quelques éléments de risques pris par les autorités de l'administration routière. Beaucoup de projets de route ont un élément significatif de risque qui y est attaché. La plupart de certains risques les plus couramment rencontrés sont :

- Les événements incontrôlables par l'ingénieur; comme les changements politiques;
- le changement dans l'économie nationale par exemple, le taux d'accroissement du trafic, le taux d'échange et les coûts de l'inflation;

- l'imprévisibilité de la performance de la chaussée due à l'environnement et au trafic et à la construction;
- les impacts sur les facteurs socio-économiques ne pouvant pas être évalués.

2.6.5 Priorité dans la sélection des projets

Dans certaines situations, le budget disponible pour entreprendre certains travaux n'est toujours suffisant pour avoir une VPN positive. Dans une telle situation, la méthode formelle de sélectionner des projets inclus dans un budget peut être appliquée à un groupe de projets qu'on rencontre dans les conditions suivantes :

- les projets indépendants c'est-à-dire une liste de projets répartis dans le pays et le choix de l'un n'affecte l'autre;
- Les projets alternatifs entre eux.

Les règles du capital budgétaire peuvent être aussi appliquées dans la situation où les fonds disponibles sont suffisants c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de contraintes budgétaires. On choisit tous les projets dont la VPN est positive ou on prend les projets alternatifs avec une VPN plus élevée.

Quand le capital rationnel doit être appliqué à cause du manque de fonds, on peut procéder par divers moyens de sélection soit les projets indépendants en considérant le ratio de la VPN sur le coût d'investissement d'une option soit les projets exclusifs en utilisant la VPN.

2.7 Coûts à l'administration

Les coûts annuels dus à l'administration routière incorporés dans l'implantation des travaux routiers seront calculés en termes économiques et/ou financiers dépendamment du type d'analyse de performance.

Le coût de chaque activité de travail sera considéré sous une catégorie budgétaire spécifique, ou une catégorie budgétaire par défaut c'est-à-dire les coûts d'investissement et d'entretien. Le coût total des travaux d'infrastructures est généralement représenté par des coûts directement liés aux travaux et ceux associés indirectement à la compensation de certaines nuisances causées à la population lors de la construction. Souvent, on ne tient pas compte de la valeur des autres coûts liés aux inconvénients causés soit par les émissions des différents types de véhicules qui, de plus en plus, méritent d'être conçus de manière à réduire les pollutions occasionnées par eux; soit des nuisances enregistrées par des travaux eux-mêmes. Au cours de ces dernières années, beaucoup d'organisations se sont intéressées à la prise en compte des impacts socio-économiques et ont présenté les coûts totaux en trois parties qui sont : les coûts directs, indirects et sociaux.

- les coûts directs sont ceux de financement des projets de la construction des travaux (planification, conception et surveillance des travaux);
- Les coûts indirects se définissent comme étant la sommation des montants donnés aux riverains des chantiers à titre de compensation pour les dommages d'intérêts dus aux travaux de construction et des compensations pour les pertes de profit aux entreprises;
- On entend par les coûts sociaux, les valeurs quantifiables ou non quantifiables représentatives d'un inconfort dû à un chantier et supportées par l'ensemble de la collectivité.

Selon HDM-4, le coût total à l'administration pour chaque option d'investissement se calcule en faisant la somme des coûts d'investissement dans la construction, la réhabilitation et les entretiens de tout type. Pour la détermination des coûts à l'administration routière (RAC) et ceux aux usagers de la route, HDM-4 peut être utilisé directement, selon Cafiso et coll.(2002). Les coûts à l'administration sont les résultats des travaux effectués à des interventions spécifiques. Sont ajoutés à ceux-là, les coûts des travaux spéciaux (l'enlèvement de neige, etc.) et la réparation des ponts. Malheureusement, celle-ci (la réparation des ponts) n'est pas incluse dans le modèle de HDM-4. Les coûts aux usagers sont composés des modèles des coûts d'exploitation des véhicules et ceux du temps de voyages.

CHAPITRE 3

CARACTÉRISTIQUES DES CHAUSSEES SOUPLES

3.1 Structure des chaussées souples

La structure des chaussées est un assemblage de couches de matériaux et d'épaisseurs différentes définies en fonction du trafic, de l'environnement et du climat selon la région considérée.

Les principales fonctions des chaussées souples ont pour but :

- de permettre aux usagers de la route de circuler en toute sécurité sur une surface de roulement de façon économique, confortable et sécuritaire;
- de pouvoir résister aux sollicitations atmosphériques les plus rigoureuses afin de maintenir une capacité portante adéquate pendant toute leur durée de vie;
- d'être en mesure de résister aux charges du trafic qui leur sont transmises tout en les distribuant aux couches inférieures.

De ce fait, les chaussées doivent être toujours entretenues et maintenues pour qu'elles puissent conserver leur qualité admissible au-dessus du seuil minimal adopté par la ville de Montréal et le Ministère des Transports du Québec, et répondre aux besoins de la société tout le long du cycle de vie défini lors de la conception.

3.2 Nombre structural

Le nombre structural défini au-dessus de chaque couche de la chaussée devrait être en mesure de supporter de façon adéquate le trafic sans déformation extrême pendant toute la durée de vie de la chaussée. La capacité portante des chaussées souples est

caractérisée par le nombre structural ajusté (SN_s) selon Parkman et Rolt (1997). Le SN_s est dérivé du nombre structural modifié qui a été adopté dans la version de HDM-III. Le nombre structural ajusté qui est utilisé dans le logiciel HDM-4 est calculé par la formule de base de Parkman et Rolt (1997), comme suit :

$$SN_s = SNBASU_s + SNSUBA_s + SNSUBG_s \quad (3.1)$$

$$SNBASU_s = 0,0394 \sum_{i=1}^n a_{is} h_i \quad (3.2)$$

Où :

- SN_s : nombre structural total ajusté par saison;
- $SNBASU_s$: contribution de la couche de surface aux couches inférieures par saison;
- $SNUBA_s$: contribution des couches inférieures par saison;
- $SNSUBG_s$: contribution du sol support par saison;
- n : nombre de couches de surface et de fondation (1, 2...);
- a_{is} : coefficients structuraux de couches de surface ou de fondation par saison;
- h_i : épaisseur des couches en mm.

Concernant les coefficients structuraux exprimant la raideur d'une épaisseur effective, HDM-4 dispose des valeurs par défaut pour les matériaux de surface et de fondation. Le SN peut être calculé en rentrant directement le CBR du sol soit en rentrant la mesure de la déflexion de la poutre de Benkelman soit en rentrant les valeurs de deflectomètre à poids tombant soit les coefficients d'équivalence et les épaisseurs des couches (AASHTO).

Cependant, dans le catalogue des chaussées souples du MTQ, on a défini un nombre structural selon la méthode de l'AASHTO en fonction des épaisseurs des couches,

des coefficients structuraux et du coefficient de drainage. Il se calcule de la façon suivante selon le catalogue des chaussées souples du MTQ:

$$SN_i = (a_i D_i + \dots + a_j m_j D_j + \dots + a_i m_i D_i) \quad (3.3)$$

Où:

SN_i : nombre structural au-dessus de la couche i;

D_j : épaisseur de la couche j;

a_j : coefficient structural de la couche j;

m_j : coefficient de drainage de la couche j.

Tableau V

Coefficients structuraux selon le catalogue des chaussées souples du MTQ

Matériaux	Coefficients structuraux
EB- Enrobé bitumineux conventionnel	0,43
FS- Fondation stabilisée- matériau neuf ou recyclé (MR5)	0,10 à 0,15
FGP- Fondation granulaire (MG20 ou MG56) et/ou pulvérisée (MR1 ou MR2)	0,08 à 0,12

Source : Catalogue des chaussées du MTQ

Ce tableau a été préparé par les responsables du MTQ en tenant compte de la nature des matériaux à utiliser dans les structures de chaussées. Un coefficient de drainage m égal 0,08 est retenu par le MTQ en fonction de la perméabilité du matériau, des pentes et des distances à drainer, et de la porosité effective.

Le principe de calcul du nombre structural se fait par couche à partir de celle de la surface tout en prenant comme support la couche qui vient immédiatement en dessous. On résout, pour la première couche c'est-à-dire la couche de surface, l'équation de l'AASHTO en considérant le SN1 avec le module réversible M_R de la deuxième couche, en suite le SN2 avec M_R de la troisième couche et ainsi de suite jusqu'à la fin selon une adaptation de la méthode AASHTO aux conditions du Québec.

3.3 Types de matériaux de surface et de fondation

On distingue généralement pour les chaussées souples deux types de surface tels le mélange bitumineux (AM) et le traitement de surface (ST). Les types de matériaux de surface utilisés dans les chaussées souples sont assez variables. Le logiciel HDM-4 donne une série de codification que l'on présente dans le tableau VI ci-après :

Tableau VI

Codification de matériaux des chaussées souples dans HDM-4

Type de surface	Description	Matériaux de surface	Description
AM	Mélange bitumineux	AC	Enrobé bitumineux
AM		CM	Enrobé traité à froid
AM		HRA	Enrobé traité à chaud
AM		PA	Enrobé bitumineux poreux
		PMA	Enrobé modifié avec de la fibre
ST	Traitement de surface	SL	Couche d'étanchéité
ST		CAPE	Scellement de fissures, etc.

La fondation est la couche sur laquelle repose le revêtement de chaussée. La sous-fondation est celle qui se trouve sur le sol support (terrain naturel ou remblai). Elles sont constituées de matériaux codés dans le logiciel DHM-4 et représentés dans le tableau VII ci-dessous.

Tableau VII

Types de fondation et matériaux codés d'après le logiciel HDM-4

Type de fondation	Description	Matériau de fondation	Description
AB	Fondation traitée au bitume	CRS	Pierre concassée
AP	«Asphalt Pavement»	NG	Gravier naturel
GB	Fondation granulaire	CS	Stabilisée au ciment
SB	Fondation stabilisée	LS	Chaux de stabilisation, etc.

Les modèles disponibles pour la codification de la chaussée souple sont construits de différents facteurs. Beaucoup sont créés à partir des types de surface et de fondation, tandis que d'autres sont créés par des matériaux de surface. Par conséquent, la modélisation est faite en termes de matériaux de surface et de fondation. HDM-4 contient des codifications par défaut pour les types de chaussée bitumineuse donnés dans le tableau VIII.

Tableau VIII

Codification des types de chaussées souples dans HDM-4

Type de chaussée	Type de surface	Type de fondation	Description du type de chaussée
AMGB	AM	GB	Mélange bitumineux sur fondation granulaire
AMAB	AM	AB	Mélange bitumineux sur fondation traitée au bitume
AMSB	AM	SB	Mélange bitumineux sur fondation stabilisée
AMAP	AM	AP	Mélange bitumineux sur «Asphalt Pavement»
STGB	ST	GB	Traitement de surface sur fondation granulaire.
STAB	ST	AB	Traitement de surface sur fondation traitée au bitume
STSB	ST	SB	Traitement de surface sur fondation stabilisée
STAP	ST	AB	Traitement de surface sur «Asphalt pavement»

Source : (NDLI, 1995)

Tous les matériaux de type fondation sont assignés par certaines valeurs de coefficients acceptables, corrects et testés adéquatement par des chercheurs internationaux, et publiés l'AIPCR et la Banque Mondiale. Chaque combinaison de la surface et de la fondation a un ensemble de valeurs des paramètres ou des indicateurs liées à la surface de la chaussée. Pour faire une évaluation économique de la chaussée, il suffit de connaître l'état actuel de la de route à analyser et son évolution dans le temps.

NDLI (1995) donne des caractéristiques employées pour définir différents types de chaussées dans la terminologie alternative appliquée aux mêmes matériaux de chaussées selon le tableau VIII ci-dessus.

Les travaux de réhabilitation modifient parfois la codification attribuée aux différents types de chaussées utilisées dans le tableau VIII ci-avant. Par exemple, si on fait un resurfaçage sur une chaussée de type AMGB, il devient AMAP après les travaux. De même, lorsqu'on met une couche de redressement sur une chaussée de type AMAP, celui-ci est devenu STAP.

3.4 Paramètres d'utilisation de base

Les variables primaires utilisées durant une année d'analyse pour définir l'état de la chaussée donnent une idée sur sa condition actuelle et son histoire. Les caractéristiques de la route au début des années d'analyse sont des données d'entrée pour bien analyser le projet de réhabilitation ou de reconstruction. À celles-ci, incluent des mesures de capacité portante, des épaisseurs de nouvelles et anciennes couches de réhabilitation, de types de matériaux, de qualité de construction, et le CBR du sol support.

Les modèles de détérioration de la route exigent encore des données d'entrée telles que les largeurs de la chaussée et du trottoir, la précipitation mensuelle, etc. Une chaussée sur laquelle il n'y a pas un resurfaçage depuis sa construction ou sa reconstruction est considérée comme une nouvelle couche de surface. Pour comprendre un peu le mécanisme de la détérioration de la route, le logiciel HDM-4 définit certains défauts de surface qu'on peut retrouver sur les chaussées souples dans le tableau XI.

Tableau IX

Définitions de certains défauts de surface selon HDM-4

Défaut de surface	Définition
Fissures en général	Toutes les fissures structurales et thermiques incluses.
fissures faibles	Fissures de 1 à 3 mm de larges (équivalent à la classe 2 de AASHTO)
Fissures majeures	Fissures supérieures à 3 mm (équivalent à la classe 4 de AASHTO). Dans le manuel d'identification et dégradations des chaussées souples au Québec, on admet : 1) les fissures faibles sont inférieures à 5 mm; 2) les fissures moyennes sont comprises entre 5 mm à 20 mm; 3) les fissures majeures sont supérieures à 20 mm.
Fissures de retrait thermique	Fissures transversales relativement perpendiculaires à l'axe de la route, généralement sur toute la largeur de la chaussée
Désenrobage et arrachement	Perte de matériaux de surface
Ornière	Déformation permanente associée au trafic dans des traces de roues sur la chaussée. Cela peut être calculé soit sur le terrain en utilisant une règle de 1,8 m déposée sur la chaussée soit de façon ponctuelle à tous les 10 m soit directement en appliquant les modèles inclus dans HDM-4
IRI	Indice de Rugosité International, la mesure de référence exprimant la rugosité comme une moyenne statistique du profil longitudinal, etc.

3.4.1 Qualité de construction des chaussées souples

La qualité de la construction dépend grandement de la variabilité dans les propriétés des matériaux et l'exécution des travaux. HDM-4 dispose un ensemble de défauts de

construction généralement constatés lors de l'exécution des travaux soit par la négligence soit par le manque d'expérience de la main-d'œuvre qualifiée. HDM-4 tient compte de tous les effets de drainage et des saisons sèches et humides. Les indicateurs de défauts de construction utilisés dans les modèles de détérioration sont ceux des défauts de construction pour les couches de surface (CDS) et ceux des défauts de construction pour les couches de fondation (CDB). Le CDS est un facteur indiquant le niveau général de la rigidité relative à la conception optimale du mélange bitumineux.

Les valeurs de CDS sont comprises entre 0.5 et 1.5. Il est utilisé le plus souvent pour prédire la qualité de la surface. Quand le CDS est égal à 1, on a une bonne qualité de la couche de surface. Le CDB est compris entre 0 et 1.5; lorsqu'il est égal à zéro, on dit qu'il n'y a pas de défauts.

Le compactage relatif des couches de revêtement, fondation, sous-fondation et sol support est très important dans la prédiction des tassements relatifs de ces couches. Plus, les couches sont mal compactées, plus, elles donneront des problèmes à l'avenir. Paterson (1987) donne un tableau de la densification initiale des différentes couches de la structure de la chaussée afin d'assurer une bonne conformité des travaux.

Tableau X

Valeurs par défaut du compactage d'après HDM-4

Conformité	Compactage relatif en %
Conformité totale dans toutes les couches	100
Conformité totale dans certaines couches	95
Conformité raisonnable dans la plupart des couches	90
Conformité insuffisante dans toutes les couches	85

Source : (Paterson, 1997)

L'évolution de certains défauts de surface est attribuée parfois aux problèmes de la manipulation des matériels, de la préparation, ou de la mauvaise technique de la réhabilitation et la reconstruction qui engendrent certains défauts structuraux. Dans HDM-III, un code de qualité de construction (QC) a été employé dans le déclenchement de fissures et des arrachements de matériaux.

3.4.2 Modèles de fissures

En général, le HDM-4 utilise deux types de fissures qui sont les fissures structurales et les fissures de retrait thermique. Elles peuvent être classées en fonction de leur gravité sur la chaussée.

Les fissures structurales sont modélisées par toutes les fissures basées sur les rapports dans HDM-III et DHM-4. Le déclenchement de ces fissures dépend le plus souvent de la surcharge de trafic ou du mauvais resurfaçage qui engendre parfois la remontée de fissures.

Les fissures de retrait thermique ou les fissures transversales sont modélisées en tant qu'une intensité exprimant le nombre des fissures par kilomètre. Un coefficient du craquage thermique a été employé comme une variable afin de prévoir l'heure du déclenchement des fissures thermiques pour tous les types de climat décrits dans les modèles de détérioration de route dans le logiciel HDM-4.

Pour chaque type de fissures, des rapports séparés sont donnés dans HDM-4 pour prévoir le temps de déclenchement et le taux de progression. Ces rapports incluent l'indicateur de défauts de construction des revêtements bitumineux.

3.4.3 Modèles de Nids de poules

Les modèles de nids de poules emploient l'indicateur de défauts de construction pour la fondation comme des variables. Dans ces modèles, les nids de poules sont exprimés en termes du nombre de trous présentés par kilomètre sous forme de cavités ouvertes (trous) sur les surfaces de la route ayant au moins 150 mm de diamètre et 25 mm de profondeur. Des nids de poule apparaissent avec la détérioration des fissures.

3.4.4 Fissures en rive selon HDM-4

Selon le logiciel HDM-4, les mesures des fissures en rive que l'utilisateur fournit dans le modèle, et les données correspondantes de rendement, seront en mètres carrés par kilomètre, et non mètres cubes par kilomètre. La valeur en mètres carrés est alors multipliée par la différence d'élévation entre le fonds de la fissure et la surface de la chaussée pour obtenir le volume de fissures en mètres cubes pour la modélisation. Selon le manuel d'identification des dégradations des chaussées souples au Québec, les fissures en rive sont parfois en forme des arcs de cercle ou en ligne droite le long de l'accotement ou de la bordure, ou présentées sous forme de décollement de la couche du revêtement le long de la bordure.

Finalement, HDM-4 est un outil très important qui prédit de façon efficace toutes les déformations des différentes couches de la chaussée tout en prévoyant un modèle de comportement pour pouvoir définir les quantités et les coûts de manière optimale. Il possède une vaste caractéristique de modélisations pouvant être adaptées à tout type de climat que l'on pourrait imaginer.

CHAPITRE 4

SAISIE DES DONNÉES ET ANALYSE DES RÉSULTATS

4.1 Réseau routier du Québec

Le réseau routier du Québec a été construit en grande partie durant les années 1960 à 1970. Ce qui explique la présence des signes de fatigue et de vieillissement. Ce réseau a environ 185 000 Km de routes qui sont gérés soit par le MTQ, soit par les Municipalités ou Hydro-Québec, etc. Par exemple, le MTQ a la gérance de 29 000 km composés d'autoroutes, de routes nationales, régionales et collectrices ainsi que 4 700 ponts et viaducs etc. Les Municipalités, de leur côté, gèrent 92 000 km de routes, rues et chemins locaux, etc. Le reste du réseau, soit environ 60 000 km, est géré par les autres Ministères provinciaux ou fédéraux, sans tenir compte des chemins d'accès.

L'estimation monétaire à neuf des infrastructures routières gérées, pour l'ensemble de la province, par le MTQ, vaut plus de 30 milliards de dollars, Source : Site Internet du MTQ. <http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/reseau/index.asp> (Consulté le 4 septembre 2004).

De 1985 à 2000, selon le MTQ, le nombre de véhicules de promenade au Québec a augmenté en moyenne de 4,53 % par an, les poids lourds subissent un accroissement moyen de 2,3 % par an. Donc, le parc automobile au Québec croît de 2,8 % en moyenne par année.

D'après une étude réalisée à l'ÉTS, sur le «Développement des courbes de comportement des chaussées souples du Ministère des Transports du Québec», on a pu obtenir les modèles de comportement de l'IRI développés selon la classification qui reflète les classes fonctionnelles des routes à l'usage du MTQ. Les routes sont identifiées en fonction des classes fonctionnelles de 10, 20,30 ou 40; pour les modèles

variables de l'IRI_e (Bergeron, 1999). L'importance des sections soumises à ces numérotations est en ordre décroissant c'est-à-dire l'autoroute a une classe fonctionnelle égale à 10. Selon cette même étude réalisée à L'ÉTS pour le MTQ sur les chaussées flexibles, on a admis qu'une mesure de l'IRI qui est supérieure à 10 mm par m, se trouve le plus souvent sur les routes non revêtues en mauvais état ou sur les chaussées revêtues en très mauvais état.

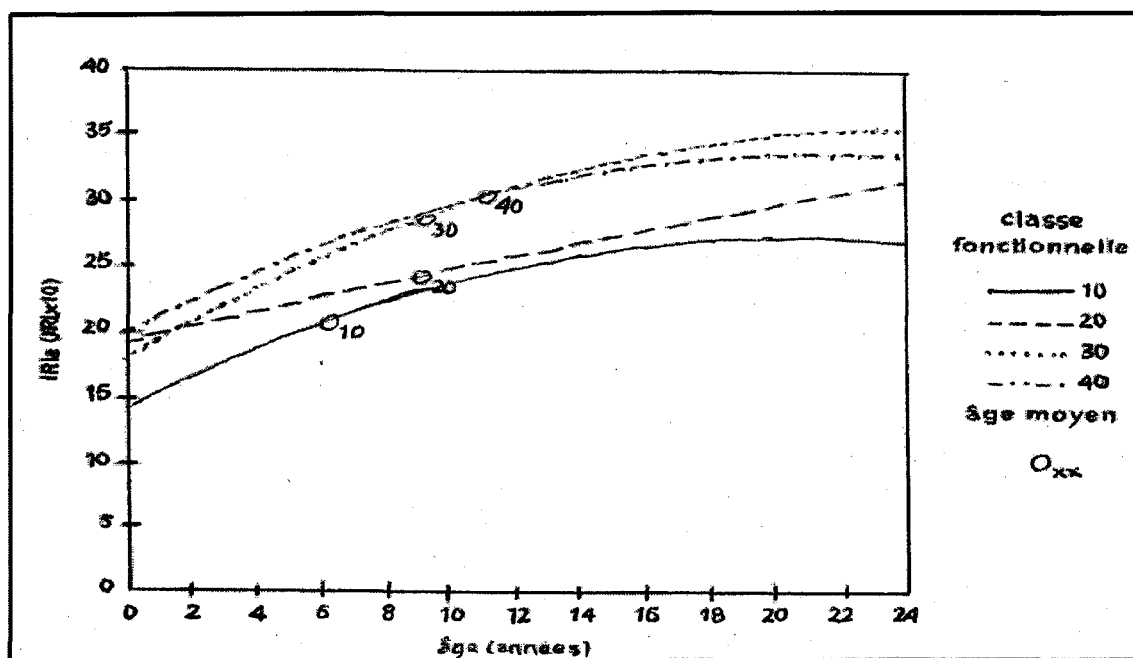


Figure 5 Modèles de comportement de l'IRI_e
Source : (Bergeron, 1999)

Dans la figure 5, les valeurs d'IRI ne sont pas exprimées en mm/m ou en m/km, mais en valeurs usuelles au Ministère des Transports du Québec selon les modalités fonctionnelles et âges moyens des sections des familles.

Lors du 39^e congrès annuel de l'Association québécoise du transport et des routes sur l'amélioration de la performance des chaussées souples, qui a eu lieu du 4 au 6 avril

2004 au Québec, Savard et Pouliot ont présenté les seuils d'interventions pour les valeurs d'IRI adoptées par le MTQ dans le tableau suivant:

Tableau XI

Seuils d'intervention d'IRI adoptés par MTQ

	Déficience mineure	Déficience majeure
Type de route	Intervention légère (resurfaçage)	Intervention majeure (Renforcement, reconstruction)
Autoroute	2,2	3,5
Nationale	2,5	4,0
Régionale	3,0	4,5
Collectrice	3,5	5,5

Source : (Savard et Pouliot, AQTR 2004)

Cependant, les valeurs de l'uni longitudinal ne sont pas les seules qui nous permettent d'intervenir sur la chaussée, mais il semble que l'on réagit le plus souvent pour ces problèmes ou encore pour les grandes fissurations. Dans le manuel d'identification des dégradations des chaussées souples, on prévoit des valeurs de l'uni sur une échelle variant de 1 à 7 c'est-à-dire de très bon à très mauvais.

4.2 Ajustement des facteurs de calibration de l'uni

Les modèles de détérioration de HDM-4 contiennent les facteurs de calibration pour faciliter le calibrage local. Ces facteurs existent par défaut dans HDM-4. Selon les modèles de base HDM-4, le facteur d'ajustement d'indice de rugosité international est défini d'après la progression annuelle relative aux conditions environnementales de la

chaussée. Le coefficient environnemental m du facteur d'ajustement a une valeur de base égale 0,023 dans le modèle suivant qui représente 2,3% de la variation annuelle de l'uni indépendamment du trafic. On a ajusté certaines valeurs de l'uni pour permettre une adaptation aux différents écarts climatiques pour pouvoir répondre aux normes de chaussées à Montréal c'est-à-dire quand IRI est égal à 1, on considère que la chaussée est très bonne. La variation « $\Delta R_{te} = 0,023 (K_{ge}) R_t$ » est apte à subir des modifications en fonction de l'environnement selon certains détails fournis par HDM-4 :

ΔR_{te} : Variation de l'uni (IRI) due à l'environnement d'après la durée de vie de la chaussée à partir de la première année;

K_{ge} : facteur de mesure de l'uni (IRI) tiré de HDM-III;

R_t : Uni (IRI) au début de l'année d'étude t .

Dans HDM-4, le facteur de calibration K_{gm} est équivalent à celui de calibration K_{ge} de HDM-III.

Le calcul de K_{ge} se fait de la manière suivante :

- identifier l'environnement sur lequel on veut travailler;
- sélectionner la valeur appropriée du coefficient selon la classification environnementale, $m = 0,2$ pour une zone humide avec gel;
- déterminer la valeur effective de m_{eff} en multipliant m par le facteur K_m en fonction du type de route et de drainage; $m_{eff} = m K_m$ avec $K_m = 0,5$;
- calculer K_{ge} en fonction de m_{eff} par la formule suivante:

$$K_{ge} = \frac{m_{eff}}{0,023}$$

4.3 Conditions climatiques

Le Québec se trouve dans l'un des endroits au monde où les conditions climatiques ont des effets néfastes sur le comportement de la chaussée. Au Québec, les écarts de température peuvent atteindre jusqu'à 60 à 70 °C selon le MTQ. La profondeur de gel varie d'une région à l'autre. Dans le cas de la ville de Montréal, la pénétration du gel dans les sols se fait de façon graduelle du haut en bas entre 1,2 m à 3 m de profondeur, et 1 à 2,6 m en Ontario. Cela pourrait endommager beaucoup les infrastructures routières et occasionnerait parfois le soulèvement des chaussées avec des conséquences très néfastes. Le climat dans lequel une route est située a toujours des impacts assez significatifs sur celle-ci. Les facteurs climatiques importants se réfèrent aux conditions de température, de précipitation et d'hiver. Sur ce, il est toujours indispensable de choisir des bitumes adaptés aux différents climats afin que l'enrobé ne devienne ni trop dur ou cassant pendant l'hiver ni trop mou en été.

La précipitation moyenne mensuelle utilisée dans la modélisation de la détérioration de la chaussée bitumineuse et de la route non revêtue s'exprime en mm par mois. Pour les chaussées en béton, on se sert de la précipitation moyenne annuelle qui s'exprime en pouce par an.

4.4 Projet d'analyse dans le cas de cette étude

Dans le cadre de ce travail, les différentes étapes du concept de l'analyse du cycle de vie des projets en utilisant le HDM-4 se résument dans le tableau suivant qui présente les différents modèles utilisés.

Tableau XII

Processus de l'analyse du cycle de vie des projets en HDM-4

INPUTS	MODÈLES	OUTPUTS
Type de véhicule, volume, taux d'accroissement, chargement, paramètres physiques, terrain, précipitation, géométrie de la route, caractéristiques de la chaussée, coûts unitaires	Début du cycle d'analyse	
Type de chaussée, capacité portante, âge, condition, ECAS	↓ Détérioration de la route	-Fissures, arrachement, nids de poules, ornières (chaussée); propriétés des matériaux, uni (IRI)
Géométrie de la route et IRI, vitesse de véhicule, paramètres de congestion, coûts unitaires	↓ Effets aux usagers de la route	- Carburant, huile, pneu, entretien, coûts fixes, vitesse, temps de voyage, coûts aux usagers routiers
Travaux routiers et stratégies	↓ Effets des travaux	-Fissures, arrachement, nids de poule, ornière, chaussée; quantité de travaux, coûts à l'administration
Géométrie de la route, texture, caractéristiques des véhicules	↓ Effets socio-environnementaux	- Niveaux des émissions, bilan énergétique, nombre d'accidents
Développement, accident, bénéfices et coûts exogènes, environnement	↓ Analyse économique	-Coûts et bénéfices y compris les bénéfices exogènes
	↓ Fin du cycle d'analyse	-Coûts totaux des composants; VPN et TRI par section

4.5 Données de section

Le réseau sur lequel on travaille, est celui de la ville de Montréal au Québec. Pour réaliser cette étude, une section sur la rue Notre-Dame a été choisie après avoir fait plusieurs simulations afin d'étudier des variantes de réhabilitation la plus économique pour les usagers routiers en fonction des états actuels de cette section. Certaines données de mesures sont obtenues grâce à la ville de Montréal et d'autres par défaut dans HDM-4, par exemple, selon le laboratoire nationale de la ville de Montréal, le tronçon Peel- Atwater a une longueur de 6 572 pieds ou 2 Km et 45 pieds de largeur ou 14 m, et a été construit en 1960. Quelques mesures retenues pour la section considérée sont données dans le tableau ci-après.

Tableau XIII

Données d'identification de la section

Identification de la section	A001-01
Longueur de la section en Km	0,500
Largeur de la section en m	14,00
Largeur moyenne de trottoir (m)	1,50
Nombre de voies	4,00
Nombre de trottoirs	2,00
AADT ou TJMA (2004), véhicule par jour	17 840
Sens du trafic	2-sens
Vitesse limite en Km/h	50,00
Condition de la chaussée en 2004	
Année de construction	1960
Épaisseur de la dalle du béton en mm	210,00
Dernière année de resurfacement de cette section	1989
Épaisseur de resurfacement en mm	52,00
Capacité portante du sol, CBR	10

4.6 Classification des travaux routiers

Dans HDM-4, les travaux routiers sont réalisés dans une structure hiérarchique de catégorie, de classes et de type. Chaque type de travaux comprend plusieurs activités et d'opérations. La classification des travaux se présente de la manière à expliquer les différences existantes entre les interventions qu'on aura à réaliser.

En ce qui concerne les catégories de travaux, il n'en existe que deux, à savoir :

- a) la préservation des chaussées existantes consistant à faire des entretiens nécessaires sur des routes détériorées en vue de garder les coûts aux usagers routiers le plus bas possible tout en gardant la route ouverte à la circulation de façon continue et en bon état;
- b) le développement des travaux a pour but d'agrandir le réseau routier pour pouvoir répondre à une augmentation du trafic en améliorant les caractéristiques géométriques routières afin de minimiser le coût total du transport et atténuer les impacts environnementaux.

À l'intérieur de chaque catégorie, il existe plusieurs classes de travaux. Les classes sont groupées en fonction de leur fréquence dans l'application du budget disponible. On distingue les travaux d'entretiens de routine ou entretiens courants, les travaux de réhabilitations périodiques et ceux de construction.

4.7 Types de travaux

On considère les types de travaux routiers en termes de leurs impacts sur les infrastructures routières comme la réparation de surface de la chaussée, le resurfaçage, la réhabilitation, la reconstruction et les travaux d'urgence. Pour chaque type de travaux, il y a plusieurs activités ou opérations et la technique que l'on pourrait appliquer selon l'état de la chaussée. On a aussi trois catégories de budgets par défaut

qui ont été répertoriés en termes d'investissements pour la réhabilitation, l'entretien et les travaux spéciaux. Les opérations consistent à la mise en place de nouvelles techniques de réparations des nids de poules, de carrelage, des fissures de toute origine, des ornières, du soulèvement différentiel, désenrobage, etc. soit par entretien courant soit par planage et resurfaçage, ou soit par reconstruction suivant l'état de la chaussée sur laquelle on aimerait intervenir.

4.7.1 Entretien courant ou de routine

Les entretiens courants ou de routine se définissent comme étant la mise en état des routes en réalisant des réparations mineures telles que le scellement des fissures, la rapiéçage des nids de poules sur la chaussée, etc. Généralement, ces travaux de réparations se font chaque année.

4.7.2 Réhabilitation des chaussées

La réhabilitation est un type de travaux nécessitant une technique spécialisée, autrement dit, plus avancée que les entretiens courants. Elle consiste soit à augmenter l'épaisseur du revêtement par une couche additionnelle appelée resurfaçage soit à enlever le revêtement existant en partie ou en totalité pour le remplacer par une nouvelle couche (planage + remise en état + resurfaçage) qui peut être conçue de façon à réduire les coûts aux usagers, etc. Lorsqu'on fait le choix d'une option, on doit tenir compte des effets suivants sur les caractéristiques de la chaussée:

- Capacité structurale de la chaussée;
- Condition de la chaussée;
- Historique de la chaussée;
- Facteurs de détérioration de la route.

4.7.3 Coûts unitaires des travaux routiers

L'utilisateur peut spécifier le coût unitaire pour chaque type d'opérations en termes économiques et /ou financiers, en utilisant l'un des coûts ci-dessous lui paraissant le mieux approprié :

- Coût par mètre carré,
- Coût par kilomètre carré,
- Coût par mètre cube,
- Coût par mètre linéaire, etc.

Les coûts unitaires sont utilisés pour multiplier les quantités physiques afin d'obtenir le coût total d'une opération. Le montant de chaque activité est calculé par année de la période d'analyse dans laquelle l'opération est faite.

4.8 Données retenues du modèle RUE pour calculer le CEV.

Les coûts unitaires utilisés dans le modèle RUE de HDM-4 ont été tirés de plusieurs compagnies qui se lancent dans la vente des véhicules, des pneus, du carburant, de l'huile, et des compagnies d'assurances, etc. On doit fixer des coûts qui reflètent ceux de la durée de vie du projet en tenant compte de l'inflation, des taxes et autres, s'il y a lieu. Les coûts financiers et économiques utilisés dans ce modèle sont déjà expliqués dans le paragraphe 2.6.3.

4.8.1 Coûts des véhicules neufs

Les prix des véhicules neufs devraient être toujours pris avec précisions. Les coûts unitaires les plus représentatifs sont ceux utilisés dans les analyses de HDM-4. Les coûts des véhicules sont estimés sans les prix des pneus c'est-à-dire ces deux prix sont calculés séparément. Le logiciel HDM-4 définit les types de véhicules. Dans une classe

représentative de véhicule, il y aura l'arrangement de plusieurs types de véhicule, chacun a son prix. La meilleure méthode pour calculer le prix représentatif de véhicule est d'utiliser les données récentes de ventes pour déterminer le nombre de types des véhicules vendus. Le coût adopté pour les calculs est le coût moyen de chaque type selon son classement dans le logiciel HDM-4. Puisque la plupart des véhicules utilitaires sont vendus dans une configuration de cabine et de châssis, il est nécessaire d'augmenter le coût pour refléter la réalité en ajoutant les coûts additionnels de la carrosserie. La même chose s'applique souvent pour les autobus lourds et certains camions.

Il est important de convertir les coûts financiers des véhicules en coûts économiques. S'il y a des frais à payer pour les droits d'entrée de certains véhicules en raison de leur capacité de moteur ou de leur pays d'origine, il est nécessaire de faire les conversions du coût financier en coût économique avant de calculer le coût moyen. S'il y a des impôts uniformes pour tous les véhicules dans une classe, le coût financier moyen peut être directement converti en coût économique. Dans beaucoup de pays, des véhicules sont complètement reconstruits à un certain kilométrage. Le coût de reconstruction est inclus au nouveau coût du véhicule et les amortissements seront plus élevés au cours de la durée de vie du véhicule.

Dans HDM-III, il n'y avait aucun mécanisme pour inclure une valeur résiduelle pour le véhicule en dotation aux amortissements. Ceux-ci peuvent être élevés dans les pays où les vieux véhicules sont assignés à différentes activités. Pour éviter ce problème, Transroute (1992) a supposé que les véhicules ont eu une valeur résiduelle égale à 30 pour cent. La valeur résiduelle a été escomptée au taux assumé de la comptabilité d'intérêt et déduite du coût de véhicule.

4.8.2 Coûts de carburant et d'huile

Dans HDM-4, le type de carburant est défini pour chaque véhicule pris en considération. Si les véhicules dans une classe représentative consomment l'essence ou le diesel, on recommande que ceux-là soient modélisés en tant que deux véhicules différents donnés par le taux de consommation de carburant. Quand il y a différents types de carburants disponibles, on doit prendre leur coût moyen par litre comme c'est le cas à Montréal.

HDM-4 demande aussi à ce qu'on prenne le coût par litre d'huile. Ceci devrait être établi de la même manière que l'essence. Il faut noter que c'est une composante mineure de coût.

4.8.3 Coût des pneus

La méthode la plus efficace pour déterminer le coût des pneus est la prise en considération le coût moyen unitaire. Le choix se fait en fonction de l'utilisation des pneus à cause de la variation de leur prix. Quel que soit le choix du pneu (avec tube ou sans tube), tout doit être pris en considération avant de calculer le coût moyen unitaire.

4.8.4 Coûts du temps et d'équipage

L'estimation du temps de déplacement devient de jour en jour un élément très important dans le cas d'une étude économique. Bien qu'il n'ait pas toujours la même valeur ou le même sens pour tous les usagers de la route, la notion du temps devrait être prise au sérieux dans tous les pays du monde. Le temps de se déplacer d'une région à l'autre s'avère de plus en plus nécessaire et coûteux. Plus la route est en mauvais état, plus le temps de se rendre d'un endroit à l'autre est long surtout lorsqu'on veut éviter les trous ou de nids de poules.

Évidemment, l'économie du temps libre est évaluée c'est-à-dire on tient compte du temps où les gens qui ne travaillent pas sont à la recherche d'un emploi. En général, les personnes aisées aiment voyager le plus rapidement possible pour des raisons personnelles. Elles sont souvent disposées à payer davantage pour avoir du confort et éviter la congestion du trafic. Certaines personnes ont fait une estimation variant de 20 à 50 pour cent de leur revenu journalier pour payer leurs frais de déplacement d'après quelques études effectuées en Europe à l'aide du logiciel HDM-4. Ceux-là qui sont autonomes et qui ne gagnent pas un revenu en fonction du temps; cette approche ne leur est pas applicable.

En résumé, il y a trois valeurs de temps de passage à considérer selon HDM-4:

- Employés voyageant durant le temps de travail;
- Employés ne voyageant pas durant le temps de travail;
- Chômeurs dans des activités non payées.

Quant au coût d'équipage, on se base sur les salaires horaires versés aux différents chauffeurs d'autobus, de camions et aux membres travaillant de concert avec ces derniers, s'il y a lieu. Cette expérience a été déjà faite dans plusieurs pays où le logiciel HDM-4 est déjà utilisé.

4.8.5 Coûts d'entretien et de main-d'œuvre des véhicules

Les coûts d'entretien et de la main-d'oeuvre devraient refléter les coûts de travail, d'outils et des frais. Il n'est pas approprié de baser ces coûts seulement sur les salaires horaires. Dans quelques pays, les salaires contiennent un certain nombre de paiements de transfert tels que les impôts, la sécurité sociale etc. que ceux-ci doivent être pris en compte lorsqu'on calcule le coût moyen.

Une des méthodes les plus simples pour estimer les coûts de la main-d'oeuvre horaire moyenne est de faire un petit sondage sur un certain nombre d'activités typiques d'entretien que l'on devrait définir comme le remplacement de l'embrayage, de l'huile à moteur, des filtres d'huile et de gaz, etc. Les garagistes et les concessionnaires devraient faire une évaluation du temps qu'on prendrait pour exécuter les réparations et tous les coûts y relatifs. Ceci donnera un coût horaire qui inclut des frais supplémentaires.

4.8.6 Taux d'intérêt

HDM-4 exige un taux d'intérêt annuel pour calculer le coût d'opportunité au propriétaire du véhicule également appelé les coûts d'actualisation. Pour l'analyse économique, le taux d'intérêt devrait être identique au taux d'actualisation. Pour des analyses financières, la valeur choisie devrait être le taux effectif. Cette valeur utilisée doit être basée sur des considérations à long terme puisque les coûts d'intérêt peuvent constituer un composant important sur les coûts d'exploitation des véhicules.

4.8.7 Coûts des frais généraux

Les coûts des frais généraux sont ceux qui sont liés au propriétaire de véhicule. Ils se composent des coûts dus à l'autorisation, à l'assurance, et à la station de service. Des frais généraux sont souvent ignorés dans les analyses où il y a un impact mineur sur les coûts influencés par les états de route. D'autres pensent qu'ils devraient être entièrement exclus dans une évaluation économique parce que les frais généraux marginaux sont égaux à zéro.

Si des frais généraux doivent être inclus dans l'analyse, c'est la meilleure des choses de les employer afin d'estimer une valeur horaire de temps de véhicule en divisant tous les frais généraux annuels par le nombre d'heures annuelles où le véhicule est utilisé selon

le tableau IV. Ce coût horaire doit être traité de manière équitable. D'où la présentation du tableau résumant les données d'entrée pour calculer le CEV dans le cas de cette étude.

Tableau XIV

Résumé des données d'entrée de la consommation de véhicules selon HDM-4 pour calculer le CEV et les coûts aux usagers de la route.

Ressource matérielle	Unité de mesure	Facteur multipliant les coûts unitaires
Carburant	Litres de carburant pour 1 000 véh. /km	Coût par litre
Huile	Litres d'huile pour 1 000 véh./km	Coût par litre
Pneu	Nombre des pneus nouveaux équivalents pour 1 000 véh./km	Coût par pneu
Main-d'œuvre d'entretien	Main-d'œuvre horaire pour 1 000 véh./km	Salaire horaire
Equipage (chauffeur, Assistant chauffeur, s'il y a lieu)	Heures pour 1 000 véh. /km	Salaire horaire
Intérêt	Fraction du coût de nouveau véhicule pour 1 000 véh./km	Intérêt sur le coût du nouveau véhicule
Frais généraux	Coût pour 1 000 véh. /km	Coût par an
Passagers au temps travail	Heures de passages pour 1 000 Véh./km allant au travail	Coût du temps par heure
Passagers au temps hors du temps de travail	Heures de passages pour 1 000 véh./km hors de travail	Coût du temps par heure
Dépréciation	Coûts de nouveaux véhicules moins ceux de pneus pour 1 000 véh. /km	Coût de nouveau véhicule moins les coûts des pneus

4.9 Interprétation des résultats obtenus

La première évaluation des résultats se porte sur les modèles des courbes d'exploitation des véhicules sur la rue Notre-Dame à Montréal au Québec en se basant sur son état actuel, plus précisément sur l'Uni en IRI. Les critères de la qualification de l'uni retenus par les Travaux Publics de la Ville de Montréal pour les chaussées en béton bitumineux se classent de manière suivante :

- IRI = 1, très bonne;
- IRI = 3, bonne;
- IRI = 4, moyenne;
- IRI = 6, passable;
- Pour IRI = 8, mauvaise;
- Pour IRI > 10.5, très mauvaise.

Pour maintenir les chaussées toujours en bon état, il faut que l'IRI reste inférieur ou égal à 3 en choisissant une option optimale de réhabilitation ou d'entretien qui sera rentable pour toute la société québécoise. Après s'être informé de quelques bases de données de la ville de Montréal, on a constaté qu'il n'existe pas vraiment une courbe d'évolution basée sur l'uni en fonction de la durée de vie des projets. Les travaux de réhabilitation et d'entretien se font suivant l'Indice Global de Performance (IGP) d'après le laboratoire de la ville de Montréal.

Dans cette étude, on a fait ressortir des courbes d'évolution de l'uni pour les options de la réhabilitation. On présente deux figures des courbes d'évolution de l'uni en fonction du temps dans le cadre de la cette étude pour la section considérée. On ne retient que la figure qui a les quatre options de réhabilitation les plus rentables à comparer à celle de base parmi les simulations qui ont été faites.

Si on continue à faire l'entretien courant ou de routine (option de base) sur ce tronçon, la dégradation de la route va s'accroître de jour en jour. Les usagers vont être victimes de cette insuffisance budgétaire.

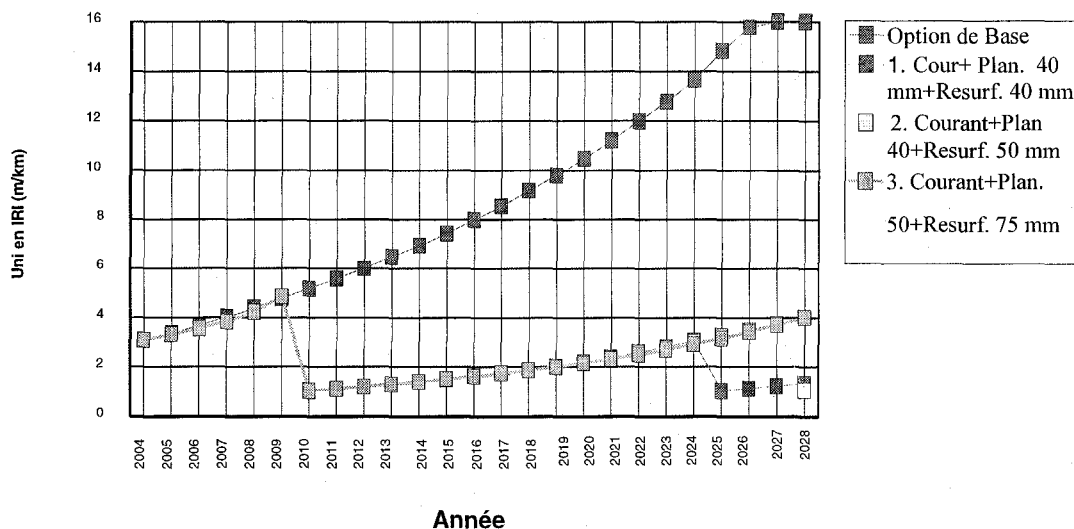


Figure 6 Évolution de l'uni (IRI) pour les trois options de réhabilitation simulées et prévues en 2009 sur la rue Notre-Dame

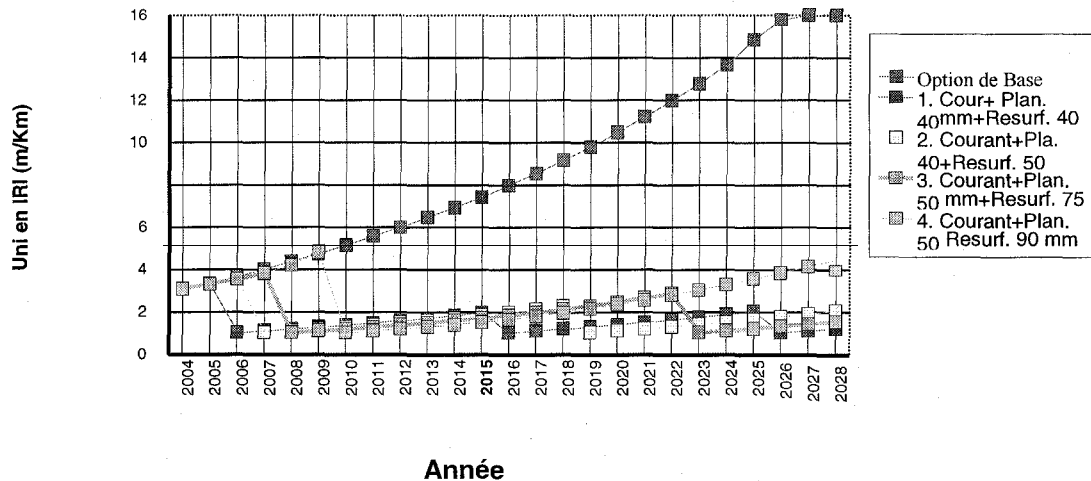
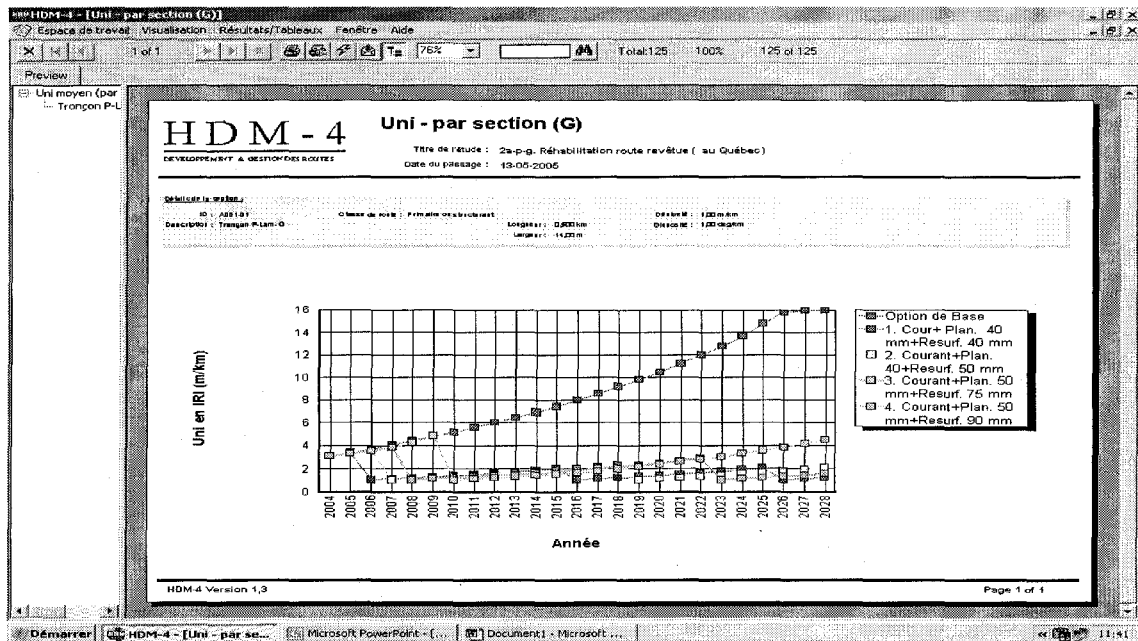


Figure 7 Évolution de l'uni (IRI) pour les quatre options de réhabilitation simulées et retenues sur la rue Notre-Dame

Les options sont choisies en fonction de la chaussée mixte existante. D'une façon générale, les réhabilitations et les entretiens sont réalisés selon les états actuels de cette chaussée en se basant sur les considérations suivantes :

- (EC), l'Entretien Courant consiste à réaliser le scellement de fissures et les réparations mineures ou les traitements de fissures sur les chaussées qui sont en bon état. Ces travaux seraient réalisés en vue de conserver l'imperméabilité de la chaussée. Cela ne demande pas un grand investissement par l'administration de la route.
- (PRR), le Planage, la Remise en état et le resurfaçage de la chaussée consistent à redonner de nouveaux profils en long et en travers aux chaussées souples ou mixtes qui sont dégradées sans altérer les couches de fondation et de sous-fondation de celles-ci.
- (R) la Réhabilitation majeure et la reconstruction se font le plus souvent lorsque les dégradations sont très élevées soit à cause du vieillissement soit à cause des effets dus au gel. Certains endommagements méritent parfois même des interventions majeures comme la reconstruction.

4.10 Estimation des coûts

L'estimation des coûts d'exploitation des véhicules sur la rue Notre-Dame à Montréal au Québec se fait selon son état actuel après avoir choisi plusieurs options de réhabilitations. Nous avons retenu les quatre meilleures options qui présentent non seulement des courbes d'évolution d'Uni (fig. 7) les plus appropriées en fonction du temps, mais aussi les meilleures rentabilités par rapport à l'option de base. Elles sont représentées comme suit :

- Option de base : Entretien Courant ou Entretien de Routine,
- Option 1 : cour + Planage 40mm +Resurfaçage 40 mm tous les 10 ans,
- Option 2 : Cour + Planage 40 mm+ Resurfaçage 50mm tous les 12 ans,
- Option 3 : Cour + Planage 50mm+ Resurfaçage 75 mm tous les 15 ans,
- Option 4 : Cour + Planage 50 mm + Resurfaçage 90 mm tous les 20 ans.

Dans le cadre de cette étude, on interprétera dans la mesure du possible les résultats de chacune de ces options afin de faire ressortir tous les détails. Les résultats de chaque option sont présentés dans un tableau en comparaison à celle de base.

Tableau XV

Option 1 : Cour + Planage 40 mm+ Resurfaçage 40mm, comparée à l'option de base; les coûts sont en millions de dollars canadiens.

	Surcoûts à l'administration		Écon. du CEV	Écon. du temps	Bénéfice net
	Invest.	Entretien			
Non actualisé	1,37	-0,17	7,20	3,82	9,83
Actualisé	0,80	-0,11	2,53	1,14	2,97

Si on avait choisi l'option 1 pour la réhabilitation de cette section de rue à partir de 2005, elle aurait été réhabilitée pendant trois fois à un intervalle de 10 ans soit en 2005, 2015 et 2025 (voir fig. 7); sur une durée d'étude égale à 25 ans. Cela demanderait à l'Administration Routière de faire un investissement actualisé égal à 800 000 dollars canadiens pour réaliser une économie de CEV =2,53 millions de dollars canadiens et une VPN= 2,97 millions dollars canadiens ou (bénéfice net actualité), par rapport à l'option de base sur période de 24 ans. Sur ce, les usagers routiers bénéficieraient, pour chaque dollar canadien investi par l'Administration de la Route, un montant de 3 dollars CAN en CEV.

Tableau XVI

Option 2 : Cour + Planage 40 mm+ Resurfaçage 50mm, comparée à l'option de base;
les coûts sont en millions de dollars canadiens.

	Surcoûts à l'administration		Écon. du CEV	Écon. du temps	Bénéfice net
	Invest.	Entretien			
Non actualisé	0,98	-0,17	7,18	3,82	10,19
Actualisé	0,65	-0,11	2,51	1,14	3,11

Si l'option 2 était choisie pour la réhabilitation de cette même section à partir de 2006, on devrait faire deux interventions sur le tronçon à tous les 12 ans soit en 2006 et 2018; sur une durée d'étude égale à 25 ans. Cela coûterait à l'Administration Routière un montant actualisé égal à 0,65 millions de dollars canadiens pour avoir une économie de CEV= 2,51 millions de dollars canadiens et une VPN=3,11 millions de dollars canadiens par rapport à l'option de base sur période de 23 ans. Pour cela, l'usager de la route pourrait économiser, pour chaque dollar investi, un montant de 4 dollars CAN en CEV.

Finalement, on présente les autres options 3 et 4 qui peuvent être interprétées de la même façon avec certaines différences qui vont être expliquées comme suit :

- L'option 3 devrait être débutée en 2007 après 3 ans d'entretien courant, dans le cas où elle aurait été acceptée, on ferait deux interventions avec un intervalle de 15 ans (voir fig. 7) soit en 2007 et 2022. On investirait 0,62 millions de dollars canadiens pour permettre aux usagers de bénéficier 2,49 millions de dollars comme une réduction de CEV avec une VPN=3,11M \$ par rapport à l'option de base. Et à chaque dollar investi dans le cas de cette réhabilitation, les usagers gagneraient 4 \$ CAN en CEV.

Tableau XVII

Option 3 : Cour + Planage 50 mm+ Resurfaçage 75 mm, comparée à l'option de base;
les coûts sont en millions de dollars canadiens.

	Surcoûts à l'administration		Écon. du CEV	Écon. du temps	Bénéfice net
	Invest.	Entretien			
Non actualisé	1,05	-0,16	7,18	3,82	10,19
Actualisé	0,62	-0,10	2,49	1,14	3,11

- Dans le cas où l'administration routière aimerait exécuter l'option 4 après 5 ans d'entretien courant (voir fig. 7), elle investirait un montant de 0,63 millions de dollars canadiens pour avoir un montant de 2,37 millions de dollars canadiens comme une réduction de CEV avec une VPN= 2,96 M \$ par rapport à l'option de base en une seule intervention soit en 2009 qui sera suivie des entretiens mineurs pour que la route puisse rester imperméable, afin de permettre aux usagers de la route de bénéficier un montant de 4 \$ CAN en CEV pour chaque dollar investi.

Tableau XVIII

Option 4 : Cour + Planage 50 mm+ Resurfaçage 90mm, comparée à l'option de base;
les coûts sont en millions de dollars canadiens.

	Surcoûts à l'administration		Écon. du CEV	Écon. du temps	Bénéfice net
	Invest.	Entretien			
Non actualisé	0,84	-0,09	6,84	3,82	9,91
Actualisé	0,63	-0,08	2,37	1,14	2,96

Tableau XIX

Différents coûts avec des estimations de VPN, TRI, Ratio, etc. avec des valeurs arrondies

option	RAC	Inv. Act	Entret.	C	B	NPV	NPV/RAC	NPV/Inv. Act.	TRI %
Option de base	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,00
Option 1	0,80	0,80	-0,11	0,70	3,67	2,97	3,699	3,702	22
Option 2	0,65	0,65	-0,11	0,55	3,65	3,11	4,753	4,757	24
Option 3	0,63	0,62	-0,10	0,52	3,63	3,11	4,955	4,978	26
Option 4	0,66	0,63	-0,08	0,55	3,51	2,96	4,512	4,715	25

Explication des colonnes de ce tableau:

RAC Coûts d'investissement actualisés dus à l'Administration Routière en millions de dollars;

Inv.Act. Investissement actualisé de l'Administration Routière en millions de dollars CAN pour divers niveaux d'augmentation budgétaire au moyen du logiciel HDM-4;

C Augmentation budgétaire due à l'administration en millions de dollars par rapport à l'option de base, $(C = [\text{Invest. Act.} + (- \text{Entret.})]$;

Entret Réduction des coûts d'entretien courant;

B Économies aux usagers de la route en millions de dollars / option de base.

NPV Bénéfice net actualisé, $\text{NPV} = B - C$

NPV/RAC Rapport Bénéfice /coûts totaux, indicateur de rentabilité d'investissement relatif.

NPV/CAP Rapport bénéfice/coût d'investissement, indicateur de rentabilité d'investissement relatif;

TRI Taux de rentabilité interne en pourcentage (%).

Certaines valeurs du tableau XIX sont aussi représentées sur les figures suivantes afin de saisir davantage l'exactitude des résultats obtenus concernant le TRI (fig. 8); la VPN, les investissements actualisés (Inv. Act.), les augmentations budgétaires (C) et les économies aux usagers de la route (B) (fig. 9).

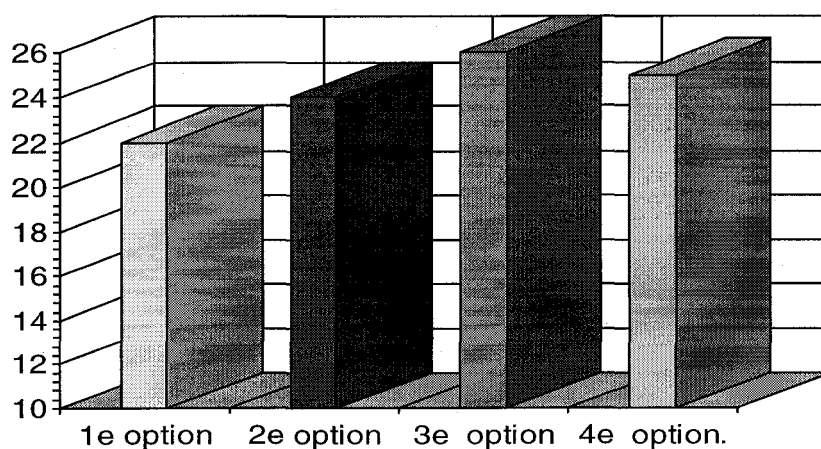


Figure 8 TRI de chacune des options en pourcentage (%)

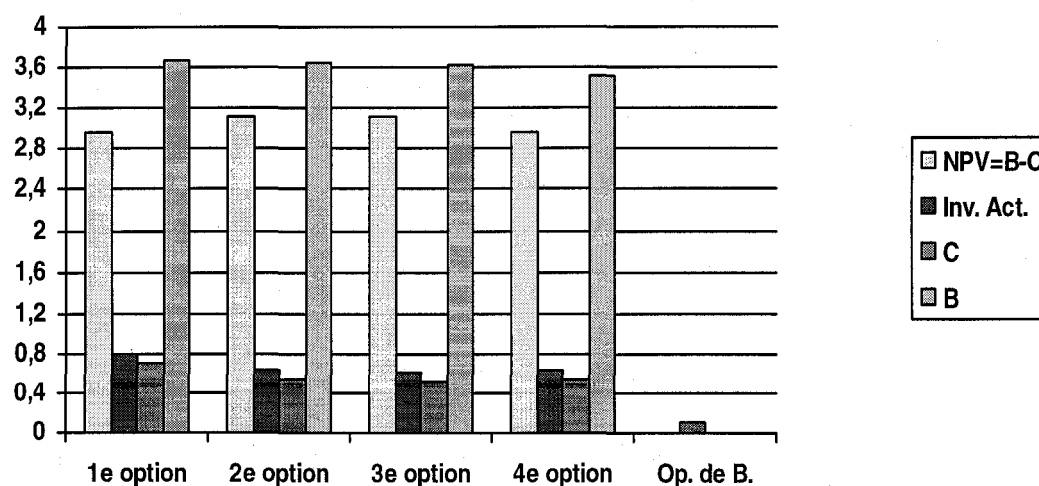


Figure 9 La valeur présente nette (NPV=B-C); Investissement actualisé net (Inv. Act.); Augmentation budgétaire (C); Économie aux usagers de la route (B)

CHAPITRE 5

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE

5.1 Évaluation du système de gestion de route d'après HDM-4

La Banque Mondiale en qualité de bailleur de fonds très important, veut, depuis des années écoulées, coordonner la recherche de la conception des routes et établir les normes d'entretien en vue de comparer des projets d'investissement des routes dans les différents pays.

Le but de HDM-III était de prévoir les coûts directement liés à la construction de la route. Les coûts de la nouvelle construction sont facilement calculables si on connaît la conception et la prédiction du trafic. Cependant les normes de la conception dépendent du trafic et de la topographie. La conception standardisée et la prédiction du trafic auront certainement des impacts directs sur le taux de la détérioration des routes et les coûts d'entretien.

5.2 Principales composantes de l'analyse de projet de HDM-4

Les principales composantes de base de l'analyse de projet à l'aide du logiciel HDM-4 sont réparties en plusieurs modules qui sont eux-mêmes subdivisés en sous-modules. Les quatre principaux modules sont les suivants:

- comment définir les projets de façon détaillée;
- comment spécifier les options en tant qu'alternatives;
- comment analyser les projets de façon optimale;
- comment produire des rapports dans les bases de données de HDM-4.

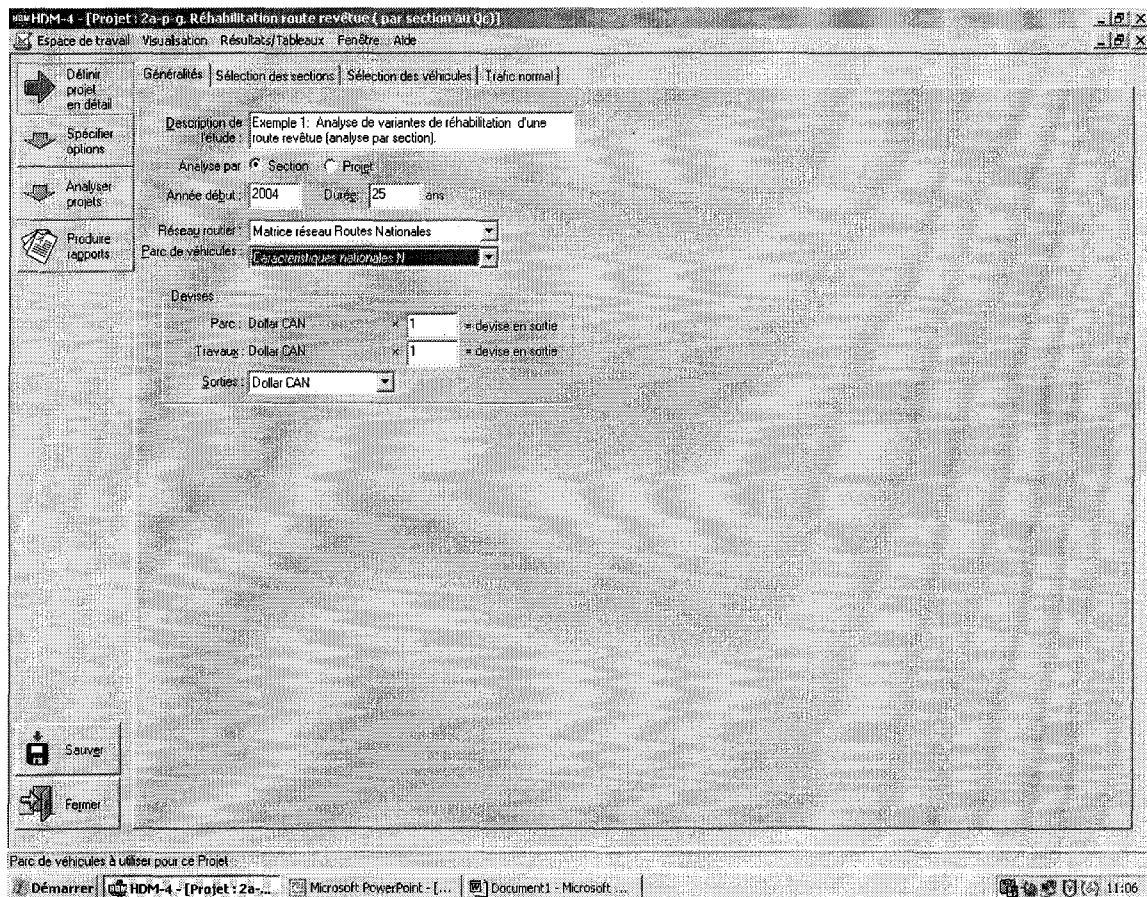


Figure 10 Composantes d'analyse de projet du logiciel HDM-4

Ces modules sont faciles à utiliser et peuvent être compris par ceux-là qu'on pourrait appeler des gens ordinaires, une fois que les données sont connues.

Au module «comment définir les projets de façon détaillée»:

- sont inclus 1) la description de l'étude, la durée de vie du projet, l'année du début de l'étude, le réseau routier, le parc de véhicules et la devise; 2) les critères de sélection de la section, l'identification de la section, le nombre de voies, le type de climat, le type de chaussée, la largeur des trottoirs ou des accotements, la vitesse limite, le type de drainage, la dénivelée et la sinuosité; 3) les propriétés des matériaux; l'épaisseur de la surface de chaussée (récente

et ancienne); la portance du sol support; les dates de construction, d'entretien et de réhabilitation de chaussée; le pourcentage de fines, etc.; 4) l'état de la chaussée, l'uni en IRI, les différents types de fissures en pourcentage, des arrachements en pourcentage, le nombre de nids de poule par km, la texture, l'adhérence et l'état de drainage; 5) la sélection des véhicules, la classe de véhicules et leurs caractéristiques de base, les coûts unitaires économiques; 6) la classification des véhicules par type selon le TMJA (AADT), la composition initiale et le taux d'accroissement.

Section: Tronçon P-Lam- G

Définition | Géométrie | Chaussée | État

Nom section : Tronçon P-Lam- G Longueur : 0,5 km

ID : A001-01 Largeur chaussée : 14 m

Nom liaison : Largeur accot : 1,5 m

ID liaison : Nombre de voies : 4

Type débit vitesse : Quatre voies ▼

Débits classés : Constant ▼

Zone climatique : Québec ▼

Classe de route : Primaire ou structurant ▼

Classe de surface : Bitumineuse ▼

Type chaussée : Enrobé sur base granulaire ▼

Trafic

Mgtorisé : 17840 TMJA

NMT : 0 TMJA

Année : 2004

Sens circ. : Deux sens ▼

Détails... OK Annuler

Largeur moyenne d'un accotement (en mètres)

Figure 11 Entrée de quelques données de la section

Au module «comment spécifier les options en tant qu'alternatives» :

- sont inclus les sections de projet; l'option de base; les options d'entretien, de réhabilitation, de construction et de reconstruction de chaussée; les normes des travaux avec leur codification et les coûts unitaires des activités de travaux, etc.

Au module «comment analyser les projets de façon optimale» :

- sont inclus le choix du type d'analyse à effectuer, le choix du répertoire d'exportation des résultats, le taux d'actualisation du projet, les valeurs temporelles, les coûts d'accidents, etc.

Le module « comment produire les rapports dans les bases de données de HDM-4 » permet aussi le transfert des résultats dans les bases de données de Windows sous format Word, Excel, etc. Finalement les analyses de stratégie et de programmation nous permettent de réaliser l'optimisation des sections alternatives.

5.3 Argumentation des résultats et analyse de sensibilité

L'insuffisance des budgets de réfection des routes à Montréal a causé un accroissement énorme des coûts d'exploitation des véhicules. Cette étude s'inscrit dans le cadre des sujets traités à l'ÉTS en vue de permettre à l'Administration Routière de faire le meilleur choix possible des budgets de réhabilitation, d'entretien et de reconstruction des chaussées à Montréal au Québec avant d'entreprendre une activité de réhabilitation. Vu la montée de CEV dû aux mauvais états des chaussées, cette étude propose, à travers le logiciel HDM-4, plusieurs possibilités de réduction des coûts d'entretien courant et celle du CEV en se basant sur la durée de vie des interventions.

Cette étude nous permet aussi de dresser le tableau XIX des valeurs (VPN, TRI, Ratio, etc.). Ce tableau repose sur un certain nombre de simulations de différents niveaux de réhabilitation avec un accroissement budgétaire et une réduction des entretiens. Ces

valeurs sont exprimées en termes de réduction des coûts totaux à la société selon les différents montants alloués aux options de la réhabilitation retenue.

Dans le cadre de cette étude, le coût à la société est égal au coût de transport qui est la somme des coûts à l'administration routière (RAC) et ceux aux usagers de la route (RUC) (voir deux exemple en annexes 1 et 2). Cela nous permet de poser les relations suivantes :

$$\text{Coût à la société} = \text{coût de transport} = \text{RAC} + \text{RUC} + \text{coûts exogènes nets} \quad (5.1)$$

Dans ce cas-ci, coûts exogènes nets = 0, puisqu'il ne s'agit pas d'une nouvelle construction ou d'un agrandissement de la route.

$$\text{RAC} = \text{coûts d'investissement} + \text{coût d'entretien} \quad (5.2)$$

$$\text{RUC} = \text{CEV} + \text{coûts du temps} \quad (5.3)$$

Après avoir analysé les différents flux monétaires de chaque option, nous avons décidé d'éliminer non seulement les options dont le TRI est inférieur au taux d'actualisation, mais aussi les options dont l'IRI n'est conforme aux exigences prescrites pour une chaussée en bon état et ce pour toute la durée de vie du projet. Pour ce faire, nous procédons à la réalisation du tableau XX ci-dessous résumant l'analyse de la sensibilité des variations du trafic et le tableau XXI présentant l'analyse de sensibilité pour la variation des prix du carburant par litre.

Tableau XX

Analyse de la sensibilité des variations du trafic en fonction du TRI_{moyen} et VPN_{moyenne}

Variation du trafic	TRI moyen en %	VPN moyenne en millions de dollars CAN
30% de réduction du trafic	20,15	1,90
20% de réduction du trafic	21,82	2,66
10% de réduction du trafic	23,32	2,64
Trafic initial	24,25	3,04
10% d'augmentation du trafic	26,15	3,44
20% d'augmentation du trafic	27,5	3,84
30% d'augmentation du trafic	28,25	4,25

D'après les différents résultats analysés et étudiés dans le cadre de cette recherche, on pourrait dire que la NPV d'une option d'investissement par rapport à l'option de base croît avec le trafic. Elle se définit comme étant la somme des bénéfices annuels nets par rapport à un taux d'escompte. Lorsqu'il n'y a pas de contraintes budgétaires; le choix entre deux ou plusieurs options d'investissement sur une chaussée quelconque devrait être celle qui a la NPV la plus élevée.

Le TRI d'un projet est l'une des méthodes les plus populaires lorsqu'il s'agit de faire une étude économique. Notre but est de viser un projet le plus rentable possible. Dans ce projet de recherche, le TRI correspondant au trafic initial varie de (22%) vingt-deux à (26%) vingt-six pour cent (fig. 8). Lorsque le trafic initial croît de 10%, le TRI croît en moyenne de 8%. Quand on fait croître le trafic de 20% et de 30%; le TRI augmente de 13,4% et 16,5% respectivement.

Cependant le TRI ne donne pas l'indication sur le montant des coûts ou des bénéfices d'un investissement; mais une mesure de retour sur l'investissement. Plus le TRI est élevé, plus il est intéressant d'investir. Si le TRI calculé est plus grand que le taux d'actualisation acceptable, alors l'investissement est économiquement justifié.

Le concept «sensibilité» qui définit la relation existante entre le changement prévu de certains paramètres et le degré d'attrait du projet réel peut être considéré pour étudier la sensibilité des autres éléments comme c'est le cas du carburant. Après avoir modifié le trafic sans varier les autres paramètres, nous avons constaté que le projet reste toujours admissible c'est-à-dire le TRI_{moyen} et la $VPN_{moyenne}$ sont nettement supérieurs à zéro.

Nous avons étudié également la variation des prix du carburant pour voir l'impact de la modification de ce paramètre sur le résultat antérieur. Cette analyse montre qu'il est toujours important d'investir dans l'entretien et la réhabilitation des chaussées parce que c'est vraiment rentable. L'ordre de la variation du TRI et de la VPN demeure inchangé pour toutes les options étudiées d'où le tableau de la variation des prix du carburant en supposant que le prix moyen initial est de 1, 00 dollar par litre.

Tableau XXI

Analyse de la sensibilité des variations des prix du carburant en fonction
du TRI_{moyen} et VPN_{moyenne}

Variation des prix du carburant	TRI moyen en %	VPN moyenne en millions de dollars CAN
20% de réduction des prix du carburant par litre	24,27	3,00
10% de réduction des prix du carburant par litre	24,67	3,00
Prix moyen initial du carburant par litre	24,77	3,00
20% d'augmentation des prix du carburant par litre	25,10	3,10
30% d'augmentation des prix du carburant par litre	25,20	3,10

Toute analyse prouve qu'il n'y a pas vraiment une grande sensibilité due aux modifications des paramètres TRI et VPN lorsque les prix du carburant varient. La décision antérieure reste idéale, car l'amplitude de l'admissibilité de ce projet est toujours importante. Si le prix du carburant grimpe et les routes en mauvais état, cela pourra sans doute décourager davantage les usagers.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Pour répondre aux besoins des usagers de la route de façon adéquate, un emploi judicieux d'un système de gestion de chaussées s'avère nécessaire afin de bien cerner tous les aspects du projet. Trop souvent, les usagers subissent les conséquences à cause de certaines contraintes budgétaires et temporelles. Pour bien servir les contribuables, il faudrait fournir des informations suffisantes et nécessaires afin d'établir une programmation objective englobant non seulement les aspects techniques et économiques de la route, mais aussi les aspects environnementaux et sociaux reliés à la chaussée. Cette programmation doit se faire de manière prioritaire pour pouvoir réaliser la meilleure réhabilitation au temps opportun, et ce pour le coût optimal durant toute la durée de vie de la chaussée. Pour y arriver, il faut faire appel aux principaux usages de la méthodologie des systèmes à savoir structurer un ensemble de connaissances et employer les outils d'analyse nécessaires pour modéliser le comportement de toutes les sections de chaussée dans le temps afin d'avoir les résultats escomptés.

Le logiciel HDM-4 est utilisé dans cette étude pour exploiter les modèles de détérioration des chaussées souples et les coûts aux usagers de la route, principalement sur la rue Notre-Dame à Montréal. La méthode d'évaluation des coûts aux usagers consiste premièrement à rechercher et comparer les défauts de chaussées obtenus et observés, et les différents termes utilisés en Amérique du Nord aux modèles de prédiction disponibles par défaut au sein du logiciel HDM-4, avant de faire une sélection pour la saisie des données; deuxièmement, à vérifier et ajuster certaines valeurs trouvées en fonction du type du réseau approprié afin de minimiser l'erreur totale entre la valeur ajustée et celle observée pour avoir de bons résultats.

Cette étude est réalisée grâce à la méthode d'optimisation des coûts aux usagers en choisissant les meilleures options possibles. Il est important de comprendre que les

données peuvent être variables d'une région à l'autre ou d'un pays à l'autre. Le logiciel HDM-4 est adapté pour tous les climats et ses modèles sont faciles à comprendre.

Pour doter d'une banque de données beaucoup plus exhaustives répondant à tous les types de routes au Québec, après avoir considéré l'importance des coûts aux usagers par rapport à ceux d'entretien, il est formellement recommandé à l'Administration de la ville de Montréal de procéder à :

- une réévaluation des allocations budgétaires afin d'éviter des dépenses exagérées et inutiles, car le budget doit être l'objet d'une décision de rentabilité économique et non une décision politique sans l'avis des experts et les gestionnaires administratifs;
- une réévaluation du parc automobile afin de faire un regroupement des véhicules en classes et en types tout en prévoyant un taux d'accroissement de façon plus détaillée pour représenter chaque type de véhicule en fonction de son poids roulant pour pouvoir mieux préparer une banque de données à cette fin;
- un inventaire du réseau afin de relever tous les défauts manquants tels l'uni, les arrachements en pourcentage, les nids de poule par km, la texture, l'adhérence, le pourcentage de l'aire fissurée, l'orniérage de façon séparée et classée etc; selon les priorités et la nécessité de la réhabilitation et de l'entretien tout en tenant compte des sections homogènes.

La Banque Mondiale encourage le financement des études des projets routiers combinant l'évaluation technique et économique des projets d'investissement, des normes de conception et d'entretien de route. L'ISOHDM a fourni une approche systématisée et adaptée à HDM-4.

Il ressort des analyses effectuées à l'aide du HDM-4 sur le tronçon de la rue Notre-Dame que le planage ou le fraisage sur une faible épaisseur de revêtement inférieure à 50 mm sur une chaussée présentant des fissures majeures n'est pas approprié économiquement parlant. Cette méthode est déconseillée lorsque des soulèvements différentiels dus à l'effet de gel sont importants et entraînent un affaiblissement de la capacité structurale de la chaussée. Il faut toujours enlever les matériaux non recyclables avant d'utiliser cette méthode.

Les bénéfices nets calculés sont réellement très significatifs quand on calcule à cet effet un taux de rentabilité de l'ordre (22) vingt-deux à (26) vingt-six sur la rue Notre-Dame. On voit tout de suite l'importance de mise en place un système d'évaluation des investissements routiers permettant à la ville de Montréal et au MTQ de réduire les coûts aux usagers avec une augmentation budgétaire. On espère que cette étude pourra assurément aider les administrateurs routiers et les décideurs politiques à bien justifier les budgets accrus pour la réfection des routes au Québec.

ANNEXE 1

Coûts annuels à l'administration et aux usagers de la route (actualisés)

Section : Tronçon P-Lam- G

Option : Option de Base

ID sec. : A001-01

Longueur : 0,500 km

Largeur : 14,00 m

Dénivelé : 1,00 m/km

Sinuosité : 1,00 deg/km

Year	Coûts administration (RAC)				Coûts usagers (RUC)					Coûts exogènes nets	Coût total de Transport
	Investis.	Fonction.	Spécial	Total RAC	CEV véh. motorisés	Temps véh. motorisés	CEV & temps v.	Accidents	Total RUC		
2004	0.000	0.009	0.000	0.009	0.815	0.742	0.000	0.000	1.557	0.000	1.566
2005	0.000	0.009	0.000	0.009	0.802	0.727	0.000	0.000	1.529	0.000	1.538
2006	0.000	0.008	0.000	0.008	0.791	0.713	0.000	0.000	1.504	0.000	1.512
2007	0.000	0.008	0.000	0.008	0.781	0.698	0.000	0.000	1.479	0.000	1.487
2008	0.000	0.007	0.000	0.007	0.771	0.684	0.000	0.000	1.455	0.000	1.463
2009	0.000	0.007	0.000	0.007	0.761	0.671	0.000	0.000	1.432	0.000	1.439
2010	0.000	0.007	0.000	0.007	0.753	0.658	0.000	0.000	1.411	0.000	1.417
2011	0.000	0.006	0.000	0.006	0.745	0.645	0.000	0.000	1.390	0.000	1.397
2012	0.000	0.006	0.000	0.006	0.738	0.633	0.000	0.000	1.370	0.000	1.376
2013	0.000	0.006	0.000	0.006	0.732	0.621	0.000	0.000	1.352	0.000	1.358
2014	0.000	0.005	0.000	0.005	0.725	0.610	0.000	0.000	1.335	0.000	1.340
2015	0.000	0.005	0.000	0.005	0.719	0.599	0.000	0.000	1.319	0.000	1.324
2016	0.000	0.005	0.000	0.005	0.715	0.591	0.000	0.000	1.306	0.000	1.311
2017	0.000	0.004	0.000	0.004	0.711	0.583	0.000	0.000	1.294	0.000	1.298
2018	0.000	0.004	0.000	0.004	0.709	0.578	0.000	0.000	1.286	0.000	1.291
2019	0.000	0.004	0.000	0.004	0.706	0.575	0.000	0.000	1.281	0.000	1.285
2020	0.000	0.004	0.000	0.004	0.706	0.575	0.000	0.000	1.280	0.000	1.284
2021	0.000	0.003	0.000	0.003	0.707	0.579	0.000	0.000	1.287	0.000	1.290
2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.710	0.587	0.000	0.000	1.298	0.000	1.298
2023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.714	0.599	0.000	0.000	1.313	0.000	1.313
2024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.721	0.616	0.000	0.000	1.337	0.000	1.337
2025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.736	2.645	0.000	0.000	1.381	0.000	1.381
2026	0.000	0.000	0.000	0.000	0.738	0.653	0.000	0.000	1.392	0.000	1.392
2027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.726	0.640	0.000	0.000	1.366	0.000	1.366
2028	0.000	0.000	0.000	0.000	0.711	0.628	0.000	0.000	1.338	0.000	1.338
Total :	0.000	0.107	0.000	0.107	18.443	15.849	0.000	0.000	34.292	0.000	34.399

Tous les coûts sont actualisés à 6,00%

Section : Tronçon P-Lam- G

Option : 1) Cour+ Plan. 40 mm+Resurf. 40 mm

ID sec. : A001-01

Longueur : 0,500 km

Largeur : 14,00 m

Dénivelé : 1,00 m/km

Sinuosité : 1,00 deg/km

Year	Coûts administration (RAC)				Coûts usagers (RUC)					Coûts exogènes nets	Coût total de Transport
	Investis.	ENTRETIEN (Fonction.)	Spécial	Total RAC	CEV véh. motorisés	Temps véh. motorisés	CEV & temps v.	Accidents	Total RUC		
2004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.815	0.742	0.000	0.000	1.557	0.000	1.557
2005	0.429	0.000	0.000	0.429	0.801	0.727	0.000	0.000	1.529	0.000	1.958
2006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.776	0.712	0.000	0.000	1.488	0.000	1.488
2007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.760	0.698	0.000	0.000	1.458	0.000	1.458
2008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.744	0.864	0.000	0.000	1.428	0.000	1.428
2009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.728	0.670	0.000	0.000	1.399	0.000	1.399
2010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.713	0.657	0.000	0.000	1.370	0.000	1.370
2011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.699	0.644	0.000	0.000	1.342	0.000	1.343
2012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.680	0.631	0.000	0.000	1.315	0.000	1.315
2013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.670	0.618	0.000	0.000	1.288	0.000	1.288
2014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.656	0.606	0.000	0.000	1.262	0.000	1.262
2015	0.240	0.000	0.000	0.240	0.643	0.594	0.000	0.000	1.237	0.000	1.476
2016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.628	0.582	0.000	0.000	1.210	0.000	1.210
2017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.615	0.570	0.000	0.000	1.185	0.000	1.185
2018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.602	0.559	0.000	0.000	1.161	0.000	1.161
2019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.590	0.548	0.000	0.000	1.138	0.000	1.138
2020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.578	0.537	0.000	0.000	1.115	0.000	1.115
2021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.566	0.525	0.000	0.000	1.092	0.000	1.092
2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.554	0.516	0.000	0.000	1.070	0.000	1.070
2023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.543	0.505	0.000	0.000	1.048	0.000	1.048
2024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.532	0.495	0.000	0.000	1.027	0.000	1.027
2025	0.134	0.000	0.000	0.134	0.521	0.486	0.000	0.000	1.007	0.000	1.140
2026	0.000	0.000	0.000	0.000	0.509	0.476	0.000	0.000	0.985	0.000	0.985
2027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.499	0.466	0.000	0.000	0.965	0.000	0.965
2028	0.000	0.000	0.000	0.000	0.488	0.457	0.000	0.000	0.946	0.000	0.946
Total :	0.803	0.001	0.000	0.803	15.915	14.709	0.000	0.000	30.624	0.000	31.427

Tous les coûts sont actualisés à 6,00%

Section : Tronçon P-Lam- G
Option : 2) Courant+Plan. 40+Resurf. 50 mm

ID sec. : A001-01

Longueur : 0,500 km

Largeur : 14,00 m

Dénivelé : 1,00 m/km

Sinuosité : 1,00 deg/km

Year	Coûts administration (RAC)				Coûts usagers (RUC)					Coûts exogènes nets	Coût total de Transport
	Investis.	Fonction.	Spécial	Total RAC	CEV véh. motorisés	Temps véh. motorisés	CEV & temps v.	Accidents	Total RUC		
2004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.815	0.742	0.000	0.000	1.557	0.000	1.557
2005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.801	0.727	0.000	0.000	1.629	0.000	1.629
2006	0.436	0.000	0.000	0.436	0.789	0.713	0.000	0.000	1.502	0.000	1.938
2007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.760	0.698	0.000	0.000	1.558	0.000	1.458
2008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.744	0.684	0.000	0.000	1.428	0.000	1.428
2009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.728	0.670	0.000	0.000	1.399	0.000	1.399
2010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.713	0.657	0.000	0.000	1.339	0.000	1.370
2011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.698	0.644	0.000	0.000	1.370	0.000	1.342
2012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.684	0.631	0.000	0.000	1.315	0.000	1.315
2013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.670	0.618	0.000	0.000	1.288	0.000	1.288
2014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.656	0.606	0.000	0.000	1.262	0.000	1.288
2015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.643	0.594	0.000	0.000	1.236	0.000	1.262
2016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.629	0.582	0.000	0.000	1.211	0.000	1.237
2017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.616	0.570	0.000	0.000	1.187	0.000	1.211
2018	0.217	0.000	0.000	0.217	0.604	0.559	0.000	0.000	1.163	0.000	1.187
2019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.590	0.548	0.000	0.000	1.137	0.000	1.380
2020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.577	0.537	0.000	0.000	1.114	0.000	1.137
2021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.566	0.526	0.000	0.000	1.092	0.000	1.114
2022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.554	0.516	0.000	0.000	1.070	0.000	1.092
2023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.543	0.505	0.000	0.000	1.048	0.000	1.070
2024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.531	0.495	0.000	0.000	1.027	0.000	1.048
2025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.521	0.486	0.000	0.000	1.006	0.000	1.027
2026	0.000	0.000	0.000	0.000	0.510	0.476	0.000	0.000	0.986	0.000	1.006
2027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.500	0.466	0.000	0.000	0.966	0.000	0.696
2028	0.000	0.000	0.000	0.000	0.489	0.457	0.000	0.000	0.947	0.000	0.947
Total :	0.653	0.001	0.000	0.654	15.931	14.709	0.000	0.000	30.640	0.000	31.293

Tous les coûts sont actualisés à 6,00%

Section : Tronçon P-Lam- G

Option : 3) Courant+Plan. 50 mm+Resurf. 75 mm

ID sec. : A001-01

Longueur : 0,500 km

Largeur : 14,00 m

Dénivelé : 1,00 m/km

Sinuosité : 1,00 deg/km

Year	Coûts administration (RAC)				Coûts usagers (RUC)					Coûts exogènes nets	Coût total de Transport
	Investis.	Fonction.	Spécial	Total RAC	CEV véh. motorisés	Temps véh. motorisés	CEV & temps v.	Accidents	Total RUC		
2004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.815	0.742	0.000	0.000	1.557	0.000	1.557
2005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.801	0.727	0.000	0.000	1.529	0.000	1.629
2006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.789	0.713	0.000	0.000	1.502	0.000	1.502
2007	0.441	0.000	0.000	0.441	0.777	0.698	0.000	0.000	1.476	0.000	1.917
2008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.744	0.674	0.000	0.000	1.428	0.000	1.428
2009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.728	0.670	0.000	0.000	1.399	0.000	1.399
2010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.713	0.657	0.000	0.000	1.370	0.000	1.370
2011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.698	0.644	0.000	0.000	1.342	0.000	1.342
2012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.684	0.631	0.000	0.000	1.315	0.000	1.315
2013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.670	0.618	0.000	0.000	1.288	0.000	1.288
2014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.656	0.606	0.000	0.000	1.262	0.000	1.262
2015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.642	0.594	0.000	0.000	1.211	0.000	1.236
2016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.629	0.582	0.000	0.000	1.187	0.000	1.211
2017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.616	0.570	0.000	0.000	2.531	0.000	1.187
2018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.604	0.559	0.000	0.000	1.163	0.000	1.163
2019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.591	0.548	0.000	0.000	1.139	0.000	1.139
2020	0.000	0.001	0.000	0.001	0.579	0.537	0.000	0.000	1.116	0.000	1.118
2021	0.000	0.001	0.000	0.001	0.568	0.526	0.000	0.000	1.094	0.000	1.095
2022	0.184	0.000	0.000	0.184	0.557	0.516	0.000	0.000	1.072	0.000	1.256
2023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.542	0.505	0.000	0.000	1.048	0.000	1.048
2024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.531	0.495	0.000	0.000	1.026	0.000	1.026
2025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.520	0.486	0.000	0.000	1.006	0.000	1.006
2026	0.000	0.000	0.000	0.000	0.509	0.475	0.000	0.000	0.985	0.000	0.985
2027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.499	0.466	0.000	0.000	0.965	0.000	0.965
2028	0.000	0.000	0.000	0.000	0.489	0.457	0.000	0.000	0.946	0.000	0.946
Total :	0.625	0.003	0.000	0.628	15.952	14.709	0.000	0.000	30.661	0.000	31.289

Tous les coûts sont actualisés à 6,00%

Section : Tronçon P-Lam- G

Option : 4) Courant+Plan. 50 mm+Resurf. 90 mm

ID sec. : A001-01

Longueur : 0,500 km

Largeur : 14,00 m

Dénivelé : 1,00 m/km

Sinuosité : 1,00 deg/km

Year	Coûts administration (RAC)				Coûts usagers (RUC)					Coûts exogènes nets	Coût total de Transport
	Investis.	Fonction.	Spécial	Total RAC	CEV véh. motorisés	Temps véh. motorisés	CEV & temps v.	Accidents	Total RUC		
2004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.815	0.742	0.000	0.000	1.557	0.000	1.557
2005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.801	0.727	0.000	0.000	1.629	0.000	1.529
2006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.789	0.713	0.000	0.000	1.502	0.000	1.502
2007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.777	0.698	0.000	0.000	1.476	0.000	1.476
2008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.768	0.684	0.000	0.000	1.452	0.000	1.452
2009	0.628	0.000	0.000	0.628	0.763	0.671	0.000	0.000	1.434	0.000	2.061
2010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.713	0.657	0.000	0.000	1.370	0.000	1.370
2011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.698	0.644	0.000	0.000	1.342	0.000	1.342
2012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.684	0.631	0.000	0.000	1.315	0.000	1.315
2013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.669	0.618	0.000	0.000	1.288	0.000	1.288
2014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.656	0.606	0.000	0.000	1.262	0.000	1.262
2015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.642	0.594	0.000	0.000	1.236	0.000	1.236
2016	0.000	0.002	0.000	0.002	0.629	0.582	0.000	0.000	1.211	0.000	1.212
2017	0.000	0.001	0.000	0.001	0.616	0.570	0.000	0.000	1.186	0.000	1.188
2018	0.000	0.004	0.000	0.004	0.603	0.559	0.000	0.000	1.162	0.000	1.166
2019	0.000	0.003	0.000	0.003	0.591	0.548	0.000	0.000	1.139	0.000	1.142
2020	0.000	0.001	0.000	0.001	0.579	0.537	0.000	0.000	1.116	0.000	1.117
2021	0.000	0.003	0.000	0.003	0.567	0.526	0.000	0.000	1.094	0.000	1.097
2022	0.000	0.001	0.000	0.001	0.556	0.516	0.000	0.000	1.072	0.000	1.073
2023	0.000	0.003	0.000	0.003	0.546	0.506	0.000	0.000	1.051	0.000	1.054
2024	0.000	0.003	0.000	0.003	0.537	0.495	0.000	0.000	1.032	0.000	1.035
2025	0.000	0.001	0.000	0.001	0.529	0.486	0.000	0.000	1.015	0.000	1.016
2026	0.000	0.002	0.000	0.002	0.522	0.476	0.000	0.000	0.998	0.000	1.000
2027	0.000	0.001	0.000	0.001	0.514	0.467	0.000	0.000	0.981	0.000	0.982
2028	0.000	0.002	0.000	0.002	0.508	0.457	0.000	0.000	0.965	0.000	0.967
Total :	0.628	0.028	0.000	0.656	16.073	14.711	0.000	0.000	30.783	0.000	31.439

Tous les coûts sont actualisés à 6,00%

ANNEXE 2

Coûts annuels à l'administration et aux usagers de la route (non actualisés)

Section : Tronçon P-Lam- G

Option : Option de Base

ID sec. : A001-01

Longueur : 0,500 km

Largeur : 14,00 m

Dénivelé : 1,00 m/km

Sinuosité : 1,00 deg/km

Year	Coûts administration (RAC)				Coûts usagers (RUC)					Coûts exogènes nets	Coût total de Transport
	Investis.	Fonction.	Spécial	Total RAC	CEV véh. motorisés	Temps véh. motorisés	CEV & temps v.	Accidents	Total RUC		
2004	0.000	0.009	0.000	0.009	0.815	0.742	0.000	0.000	1.557	0.000	1.566
2005	0.000	0.009	0.000	0.009	0.850	0.771	0.000	0.000	1.621	0.000	1.630
2006	0.000	0.009	0.000	0.009	0.889	0.801	0.000	0.000	1.689	0.000	1.699
2007	0.000	0.009	0.000	0.009	0.930	0.832	0.000	0.000	1.761	0.000	1.771
2008	0.000	0.009	0.000	0.009	0.973	0.864	0.000	0.000	1.837	0.000	1.847
2009	0.000	0.009	0.000	0.009	1.019	0.898	0.000	0.000	1.917	0.000	1.926
2010	0.000	0.009	0.000	0.009	1.068	0.933	0.000	0.000	2.001	0.000	2.010
2011	0.000	0.009	0.000	0.009	1.121	0.970	0.000	0.000	2.091	0.000	2.100
2012	0.000	0.009	0.000	0.009	1.176	1.008	0.000	0.000	2.184	0.000	2.193
2013	0.000	0.009	0.000	0.009	1.236	1.049	0.000	0.000	2.285	0.000	2.294
2014	0.000	0.009	0.000	0.009	1.298	1.092	0.000	0.000	2.390	0.000	2.400
2015	0.000	0.009	0.000	0.009	1.366	1.138	0.000	0.000	2.504	0.000	2.513
2016	0.000	0.009	0.000	0.009	1.439	1.188	0.000	0.000	2.628	0.000	2.637
2017	0.000	0.009	0.000	0.009	1.517	1.243	0.000	0.000	2.760	0.000	2.769
2018	0.000	0.009	0.000	0.009	1.602	1.306	0.000	0.000	2.908	0.000	2.918
2019	0.000	0.009	0.000	0.009	1.693	1.377	0.000	0.000	3.070	0.000	3.079
2020	0.000	0.009	0.000	0.009	1.793	1.460	0.000	0.000	3.253	0.000	3.262
2021	0.000	0.009	0.000	0.009	1.905	1.560	0.000	0.000	3.465	0.000	3.475
2022	0.000	0.000	0.000	0.000	2.027	1.676	0.000	0.000	3.704	0.000	3.704
2023	0.000	0.000	0.000	0.000	2.161	1.812	0.000	0.000	3.973	0.000	3.973
2024	0.000	0.000	0.000	0.000	2.313	1.974	0.000	0.000	4.287	0.000	4.287
2025	0.000	0.000	0.000	0.000	2.502	2.191	0.000	0.000	4.693	0.000	4.693
2026	0.000	0.000	0.000	0.000	2.661	2.355	0.000	0.000	5.015	0.000	5.015
2027	0.000	0.000	0.000	0.000	2.771	2.446	0.000	0.000	5.218	0.000	5.218
2028	0.000	0.000	0.000	0.000	2.877	2.541	0.000	0.000	5.418	0.000	5.418
Total :	0.000	0.169	0.000	0.169	40.000	34.228	0.000	0.000	74.229	0.000	74.397

Section : Tronçon P-Lam- G

Option : 1) Cour+ Plan. 40 mm+Resurf. 40 mm

ID sec. : A001-01

Longueur : 0,500 km

Largeur : 14,00 m

Dénivelé : 1,00 m/km

Sinuosité : 1,00 deg/km

Year	Coûts administration (RAC)				Coûts usagers (RUC)					Coûts exogènes nets	Coût total de Transport
	Investis.	ENTRETIEN (Fonction.)	Spécial	Total RAC	CEV véh. motorisés	Temps véh. motorisés	CEV & temps v.	Accidents	Total RUC		
2004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.815	0.742	0.000	0.000	1.557	0.000	1.557
2005	0.455	0.000	0.000	0.455	0.850	0.771	0.000	0.000	1.620	0.000	2.075
2006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.872	0.801	0.000	0.000	1.672	0.000	1.672
2007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.905	0.832	0.000	0.000	1.736	0.000	1.736
2008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.939	0.864	0.000	0.000	1.803	0.000	1.803
2009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.975	0.897	0.000	0.000	1.872	0.000	1.872
2010	0.000	0.000	0.000	0.000	1.012	0.932	0.000	0.000	1.944	0.000	1.944
2011	0.000	0.000	0.000	0.000	1.050	0.968	0.000	0.000	2.019	0.000	2.019
2012	0.000	0.000	0.000	0.000	1.090	1.006	0.000	0.000	2.096	0.000	2.096
2013	0.000	0.000	0.000	0.000	1.132	1.045	0.000	0.000	2.177	0.000	2.177
2014	0.000	0.000	0.000	0.000	1.175	1.085	0.000	0.000	2.260	0.000	2.261
2015	0.455	0.000	0.000	0.455	1.220	1.127	0.000	0.000	2.348	0.000	2.803
2016	0.000	0.000	0.000	0.000	1.264	1.171	0.000	0.000	2.435	0.000	2.435
2017	0.000	0.000	0.000	0.000	1.312	1.217	0.000	0.000	2.528	0.000	2.528
2018	0.000	0.000	0.000	0.000	1.362	1.264	0.000	0.000	2.626	0.000	2.626
2019	0.000	0.000	0.000	0.000	1.414	1.313	0.000	0.000	2.727	0.000	2.727
2020	0.000	0.000	0.000	0.000	1.468	1.364	0.000	0.000	2.832	0.000	2.832
2021	0.000	0.000	0.000	0.000	1.524	1.417	0.000	0.000	2.941	0.000	2.941
2022	0.000	0.000	0.000	0.000	1.582	1.472	0.000	0.000	3.054	0.000	3.054
2023	0.000	0.000	0.000	0.000	1.643	1.529	0.000	0.000	3.172	0.000	3.172
2024	0.000	0.000	0.000	0.000	1.706	1.589	0.000	0.000	3.295	0.000	3.295
2025	0.455	0.000	0.000	0.455	1.771	1.651	0.000	0.000	3.422	0.000	3.877
2026	0.000	0.000	0.000	0.000	1.834	1.715	0.000	0.000	3.549	0.000	3.549
2027	0.000	0.000	0.000	0.000	1.905	1.782	0.000	0.000	3.686	0.000	3.686
2028	0.000	0.000	0.000	0.000	1.978	1.851	0.000	0.000	3.829	0.000	3.829
Total :	1.365	0.001	0.000	1.366	32.797	30.404	0.000	0.000	63.201	0.000	64.567

Section : Tronçon P-Lam- G
Option : 2) Courant+Plan. 40+Resurf. 50 mm

ID sec. : A001-01

Longueur : 0,500 km

Largeur : 14,00 m

Dénivelé : 1,00 m/km

Sinuosité : 1,00 deg/km

Year	Coûts administration (RAC)				Coûts usagers (RUC)					Coûts exogènes nets	Coût total de Transport
	Investis.	Fonction.	Spécial	Total RAC	CEV véh. motorisés	Temps véh. motorisés	CEV & temps v.	Accidents	Total RUC		
2004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.815	0.742	0.000	0.000	1.557	0.000	1.557
2005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.850	0.771	0.000	0.000	1.620	0.000	1.620
2006	0.490	0.000	0.000	0.490	0.886	0.801	0.000	0.000	1.687	0.000	2.177
2007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.905	0.832	0.000	0.000	1.736	0.000	1.736
2008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.939	0.864	0.000	0.000	1.803	0.000	1.803
2009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.975	0.897	0.000	0.000	1.872	0.000	1.872
2010	0.000	0.000	0.000	0.000	1.012	0.932	0.000	0.000	1.944	0.000	1.944
2011	0.000	0.000	0.000	0.000	1.050	0.968	0.000	0.000	2.018	0.000	2.018
2012	0.000	0.000	0.000	0.000	1.090	1.006	0.000	0.000	2.096	0.000	2.096
2013	0.000	0.000	0.000	0.000	1.132	1.045	0.000	0.000	2.176	0.000	2.177
2014	0.000	0.000	0.000	0.000	1.175	1.085	0.000	0.000	2.260	0.000	2.260
2015	0.000	0.000	0.000	0.000	1.220	1.127	0.000	0.000	2.347	0.000	2.347
2016	0.000	0.000	0.000	0.000	1.266	1.171	0.000	0.000	2.438	0.000	2.438
2017	0.000	0.000	0.000	0.000	1.315	1.217	0.000	0.000	2.532	0.000	2.532
2018	0.490	0.000	0.000	0.490	1.365	1.264	0.000	0.000	2.629	0.000	3.119
2019	0.000	0.000	0.000	0.000	1.413	1.313	0.000	0.000	2.726	0.000	2.726
2020	0.000	0.000	0.000	0.000	1.467	1.364	0.000	0.000	2.831	0.000	2.831
2021	0.000	0.000	0.000	0.000	1.523	1.417	0.000	0.000	2.940	0.000	2.940
2022	0.000	0.000	0.000	0.000	1.581	1.472	0.000	0.000	3.053	0.000	3.053
2023	0.000	0.000	0.000	0.000	1.642	1.529	0.000	0.000	3.171	0.000	3.171
2024	0.000	0.000	0.000	0.000	1.704	1.589	0.000	0.000	3.293	0.000	3.293
2025	0.000	0.000	0.000	0.000	1.770	1.651	0.000	0.000	3.420	0.000	3.421
2026	0.000	0.000	0.000	0.000	1.838	1.715	0.000	0.000	3.553	0.000	3.553
2027	0.000	0.000	0.000	0.000	1.908	1.782	0.000	0.000	3.690	0.000	3.690
2028	0.000	0.000	0.000	0.000	1.981	1.851	0.000	0.000	3.833	0.000	3.833
Total :	0.980	0.002	0.000	0.982	32.821	30.404	0.000	0.000	63.225	0.000	64.206

Section : Tronçon P-Lam- G
Option : 3) Courant+Plan. 50 mm+Resurf. 75 mm

ID sec. : A001-01

Longueur : 0,500 km

Largeur : 14,00 m

Dénivelé : 1,00 m/km

Sinuosité : 1,00 deg/km

Year	Coûts administration (RAC)				Coûts usagers (RUC)					Coûts exogènes nets	Coût total de Transport
	Investis.	Fonction.	Spécial	Total RAC	CEV véh. motorisés	Temps véh. motorisés	CEV & temps v.	Accidents	Total RUC		
2004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.815	0.742	0.000	0.000	1.557	0.000	1.557
2005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.850	0.771	0.000	0.000	1.620	0.000	1.620
2006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.886	0.801	0.000	0.000	1.687	0.000	1.687
2007	0.525	0.000	0.000	0.525	0.926	0.832	0.000	0.000	1.758	0.000	2.283
2008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.939	0.864	0.000	0.000	1.803	0.000	1.803
2009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.974	0.897	0.000	0.000	1.872	0.000	1.872
2010	0.000	0.000	0.000	0.000	1.012	0.932	0.000	0.000	1.944	0.000	1.944
2011	0.000	0.000	0.000	0.000	1.050	0.968	0.000	0.000	2.018	0.000	2.018
2012	0.000	0.000	0.000	0.000	1.090	1.006	0.000	0.000	2.096	0.000	2.096
2013	0.000	0.000	0.000	0.000	1.131	1.045	0.000	0.000	2.176	0.000	2.176
2014	0.000	0.000	0.000	0.000	1.175	1.085	0.000	0.000	2.260	0.000	2.260
2015	0.000	0.000	0.000	0.000	1.219	1.127	0.000	0.000	2.347	0.000	2.347
2016	0.000	0.000	0.000	0.000	1.266	1.171	0.000	0.000	2.437	0.000	2.437
2017	0.000	0.000	0.000	0.000	1.314	1.217	0.000	0.000	2.531	0.000	2.531
2018	0.000	0.000	0.000	0.000	1.365	1.264	0.000	0.000	2.629	0.000	2.629
2019	0.000	0.000	0.000	0.000	1.417	1.313	0.000	0.000	2.730	0.000	2.730
2020	0.000	0.003	0.000	0.003	1.472	1.364	0.000	0.000	2.836	0.000	2.839
2021	0.000	0.003	0.000	0.003	1.529	1.417	0.000	0.000	2.946	0.000	2.949
2022	0.525	0.000	0.000	0.525	1.589	1.472	0.000	0.000	3.061	0.000	3.586
2023	0.000	0.000	0.000	0.000	1.640	1.529	0.000	0.000	3.169	0.000	3.169
2024	0.000	0.000	0.000	0.000	1.703	1.589	0.000	0.000	3.292	0.000	3.292
2025	0.000	0.000	0.000	0.000	1.768	1.651	0.000	0.000	3.419	0.000	3.419
2026	0.000	0.000	0.000	0.000	1.836	1.715	0.000	0.000	3.551	0.000	3.551
2027	0.000	0.000	0.000	0.000	1.906	1.782	0.000	0.000	3.688	0.000	3.688
2028	0.000	0.000	0.000	0.000	1.979	1.851	0.000	0.000	3.830	0.000	3.830
Total :	1.050	0.008	0.000	1.058	32.850	30.404	0.000	0.000	63.254	0.000	64.312

Section : Tronçon P-Lam- G

Option : 4) Courant+Plan. 50 mm+Resurf. 90 mm

ID sec. : A001-01

Longueur : 0,500 km

Largeur : 14,00 m

Dénivelé : 1,00 m/km

Sinuosité : 1,00 deg/km

Year	Coûts administration (RAC)				Coûts usagers (RUC)					Coûts exogènes nets	Coût total de Transport
	Investis.	Fonction.	Spécial	Total RAC	CEV véh. motorisés	Temps véh. motorisés	CEV & temps v.	Accidents	Total RUC		
2004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.815	0.742	0.000	0.000	1.557	0.000	1.557
2005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.850	0.771	0.000	0.000	1.620	0.000	1.620
2006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.886	0.801	0.000	0.000	1.687	0.000	1.687
2007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.926	0.832	0.000	0.000	1.758	0.000	1.758
2008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.969	0.864	0.000	0.000	1.833	0.000	1.833
2009	0.840	0.000	0.000	0.840	1.021	0.898	0.000	0.000	1.919	0.000	2.759
2010	0.000	0.000	0.000	0.000	1.011	0.932	0.000	0.000	1.943	0.000	1.943
2011	0.000	0.000	0.000	0.000	1.050	0.968	0.000	0.000	2.018	0.000	2.018
2012	0.000	0.000	0.000	0.000	1.089	1.006	0.000	0.000	2.095	0.000	2.095
2013	0.000	0.000	0.000	0.000	1.131	1.045	0.000	0.000	2.176	0.000	2.176
2014	0.000	0.000	0.000	0.000	1.174	1.085	0.000	0.000	2.259	0.000	2.259
2015	0.000	0.000	0.000	0.000	1.219	1.127	0.000	0.000	2.346	0.000	2.346
2016	0.000	0.003	0.000	0.003	1.265	1.171	0.000	0.000	2.437	0.000	2.440
2017	0.000	0.003	0.000	0.003	1.314	1.217	0.000	0.000	2.530	0.000	2.534
2018	0.000	0.009	0.000	0.009	1.364	1.264	0.000	0.000	2.628	0.000	2.637
2019	0.000	0.008	0.000	0.008	1.417	1.313	0.000	0.000	2.730	0.000	2.738
2020	0.000	0.003	0.000	0.003	1.471	1.364	0.000	0.000	2.835	0.000	2.838
2021	0.000	0.009	0.000	0.009	1.528	1.417	0.000	0.000	2.945	0.000	2.954
2022	0.000	0.003	0.000	0.003	1.588	1.472	0.000	0.000	3.060	0.000	3.063
2023	0.000	0.009	0.000	0.009	1.651	1.530	0.000	0.000	3.181	0.000	3.190
2024	0.000	0.008	0.000	0.008	1.722	1.589	0.000	0.000	3.311	0.000	3.319
2025	0.000	0.003	0.000	0.003	1.799	1.651	0.000	0.000	3.450	0.000	3.453
2026	0.000	0.009	0.000	0.009	1.879	1.715	0.000	0.000	3.595	0.000	3.603
2027	0.000	0.003	0.000	0.003	1.965	1.782	0.000	0.000	3.748	0.000	3.751
2028	0.000	0.009	0.000	0.009	2.055	1.852	0.000	0.000	3.907	0.000	3.916
Total :	0.840	0.081	0.000	0.921	33.160	30.408	0.000	0.000	63.568	0.000	64.489

BIBLIOGRAPHIE

Association Internationale Permanente des congrès de la route. *Information sur les données HDM-4 de l'AIPCR*, [En ligne].

<http://hdm4.piarc.org/info/HDMfeatures-e.htm> (Consulté le 30 juin 2004).

Association Internationale Permanente des Congrès de la Route. *Information sur les services HDM-4 de l'AIPCR*, [En ligne].

<http://hdm4.piarc.org/services/obtain-e.htm> (Consulté le 30 juin 2004).

Association Internationale Permanente des Congrès de la Route. *Termes de référence pour les thèmes stratégiques et les comités techniques. Extraits du plan stratégique de l'AIPCR (2004-2007)*, (3^e projet), Janvier 2004.

Attoh-Okine, N.O. (2002). Uncertainty analysis in structural number determination in flexible design - a convex model approach. *Construction and building materials*, 16 (2002), 67-71.

Bernard, F., Pierre, S. (1998). Towards an Integrated and Intelligent System for Managing Municipal Infrastructures. *In proceeding of fourth International Conference on Managing Pavements*, may 17-21st, 1998, 1436-1453.

Bergeron, C. (1999). *Développement des courbes de comportement des chaussées souples du Ministère des transports du Québec*. Mémoire de Maîtrise, Département de génie de construction, École de Technologie supérieure, Université du Québec, Montréal, Canada.

Cafiso, S., Di Graziano, A., Kerali, H. R., Odoki, J. B. (2002). Multicriteria analysis method for pavement maintenance management. *Transportation Research Record*, 1816, 73-84.

Cinq volumes du manuel de la Nouvelle Version «HDM-4 Documentation» (2004) : (1) *HDM-4 Overview*; (2) *HDM-4 Applications Guide*; (3) *HDM-4 Software User Guide*; (4) *HDM-4 Technical Reference Manual*; (5) *Calibration Reference Manual*.

Costet, J. & Sanglerat, G. (1983). *Cours pratique de mécanique des sols* (3^e éd.). Paris, France.

Étude Internationale de développement et de la gestion des routes. *Brochure d'info sur les produits HDM4*, [En ligne].

<http://civhrg.bham.ac.uk/ISOHDM/AboutHDM.hdm> (Consulté le 30 juin 2004).

Gifford, J. L., Uzarski, D. R. & McNeil, S. (1993). *Infrastructure Planning and Management*. New York: American Society of civil Engineers.

Haas, R. C. G., & Association des transports du Canada. (1997). *Pavement design and management guide*. Ottawa: Transportation Association of Canada.

HDM-4 Highway Development & Management. *Modelling Road User Environmental effects*, [En ligne].

[http:// www.romdas.com/project/hdm-4/01-01-11_rue_book_final.pdf](http://www.romdas.com/project/hdm-4/01-01-11_rue_book_final.pdf) (Consulté le 4 septembre 2004)

Hoban C.J. (1987). *Evaluating Traffic Capacity and Improvements to Road Geometry*. World Bank, Technical Report, Paper Number 74. World Bank, Washington D.C.,USA.

Huhtala, M., Vesimäki, M., Halonen, P. (1992). Computer simulation of Road-Vehicle Dynamic Interaction forces of three and four axle trucks. In B. Kulakowski (Ed.), *Vehicle Road Interaction, 1992*, 36-51. Philadelphia, P.A.: American Society for Testing and Materials.

Institut de recherche en construction. *Cause Oriented Deterioration Modelling for Urban Pavement Management*, [En ligne].

[http://www.irc.nrc-cnrc.gc.ca/filltext/apwa/roads2 .pdf](http://www.irc.nrc-cnrc.gc.ca/filltext/apwa/roads2.pdf) (Consulté le 20 avril 2005).

Kostuk, K.J. (2003). Quantifying uncertainty associated with long-term maintenance contacts. *Unpublished PhD, the University of Saskatchewan, Canada*.

Laboratoire des chaussées. (1997). *Guides et Manuels Techniques – Guide de relevé de circulation*. Gouvernement du Québec, dépôt légal, 1997.

Lepert, P., Leroux, S., Savard, Y. (2003). Use of Pavement Performance Models to Improve Efficiency of Data Collection Procedures. *Article présenté au 3rd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavement and Technological control*, 5-11 juillet 2003, Guimaraes, Portugal.

Mamlouk, M.S., Zaniewski, J.P. (2000). Analysis and design optimization of flexible pavement. *J. of Transportation Engineering*, march-April 2000, 161-167.

NDLI (1995). *Modelling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4*. Final Report Asian Development. Bank Project RETA 5549. N.D. Lea International, Vancouver.

Park, C.S., Pelot, R., Porteous, K.C. & Zuo, M.J. (2002). *Analyse économique en ingénierie*, édition du nouveau pédagogique Inc.

Paterson W.D.O. (1987). *Road Deterioration and Maintenance Effects*. World Bank Publications. Washington, D.C., USA.

PIARC Commission on Terminology. *Technical Dictionary of Road Terms*, (7th edition), [En ligne].

http://www.romdas.com/project/hdm-4/01-01-11_rue_book_final.pdf (Consulté le 4 septembre 2004)

Savard, Y., Lepert, P., Leroux, D., De Blois, K., Rèche, M. (2004). Development of pavement performance model from test section database. Application to maintenance strategies. *Presented to 2nd European pavement and asset management conference*, march, 22-24th, 2004, Berlin, Germany.

Savard, Y., Leroux, D., De blois, K., Lepert, P. (2004). Utilisation des modèles de performance pour la conception des chaussées. *Article présenté au 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics*. Roads and Airports, June, 6-10th, 2004, Toronto, Canada.

Savard, Y., Lepert, P. (2004). Amélioration de la performance des chaussées souples 1992-2002 Construction ou reconstruction. *Article présenté lors du 39^e congrès annuel de l'AQTR*, 4-6 avril 2004, Québec, Canada.

School of civil Engineering, Université de Birmingham. *Road maintenance management*, [En ligne].

<http://www.ias.ac.in/currsci/oct/articles26.htm> (Consulté le 3 juillet 2004).

Site Internet du MTQ.

<http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/reseau/index.asp> (Consulté le 4 septembre 2004).

Site Internet du MTQ.

<http://www.mtq.gouv.qc.ca/fr/modes/sti.asp> (Consulté le 4 septembre 2004)

Site Internet du MTQ.

<http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/reseau/chaussée/chaussée.asp> (Consulté le 4 septembre 2004)

Transports du Québec (2002). *Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples*. Ministère des transports du Québec. Association québécoise du transport et des routes. Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines. Association des ingénieurs municipaux du Québec et quatre firmes de consultants de la Province de Québec.

Tighe, S., Knight, M., Papoutsis, D., Rodriguez, V., Walker, C. (2002). User cost savings in eliminating pavement excavations through employing trenchless technologies. *Canadian journal Civil Engineering*, vol.29, 751-761.

Vischer, W. (2003). Low-volume Road Flexible Pavement Design with Geogrid-Reinforced Base. *Transportation Research Record*, 1819, 247-254.

Watanatada, T., Dhareshwar, A. M. & Rezende Lima P.R.S. (1987b). *Vehicle speeds and operating costs-HDM-III Series*, 1987. World Bank, John Hopkins University Press.

Yoo, Y. (2004). *Multi-period optimization of pavement management systems*. Texas a&M University, May 2004.